

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění montáže a strojírenské technologie

**Technologie dokončovacích procesů pro součásti
vyráběné kovovým 3D tiskem**

Technology of Finishing Process for Metal 3D Printing Parts

Student:

Bc. Tomáš Smolicha

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jiří Hajnýš, Ph.D

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Smolicha**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Téma: Technologie dokončovacích procesů pro součásti vyráběné kovovým 3D tiskem
Technology of Finishing Process for Metal 3D Printing Parts
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Teoretický rozbor problematiky.
3. Experimentální návrh řešení problematiky.
4. Kvalitativní zhodnocení řešeného návrhu.
5. Technicko-ekonomické zhodnocení.
6. Diskuze a závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

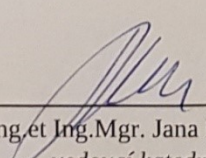
SUN, Y.; BAILEY, R.; MOROZ, A. *Surface finish and properties enhancement of selective laser melted 316L stainless steel by surface mechanical attrition treatment*, Surface and Coatings Technology, 2019
ZHANG, J.; CHAUDHARY, A.; WANG, H. *Surface quality and material removal in magnetic abrasive finishing of selective laser melted 316L stainless steel*, Journal of Manufacturing Processes, Volume 45, 2019, Pages 710-719
GIBSON, I, D ROSEN a B STUCKER. *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*. New York: Springer, c2010, xxii, 459 p. ISBN 1441911200.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

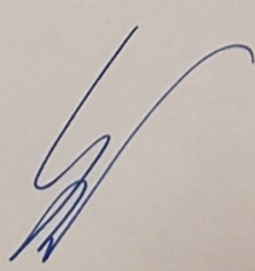
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Hajnýš, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry

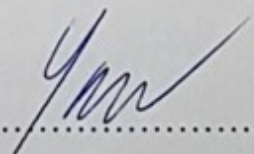



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 18. května 2020.

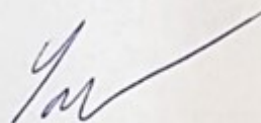

.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou^{*)} práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užit tuto závěrečnou bakalářskou^{*)} práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské^{*)} práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užit dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užit toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská^{*)} práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne: 18.5.2020



Podpis autora práce

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

SMOLICHA, T *Technologie dokončovacích procesů pro součásti vyráběné kovovým 3D tiskem*: diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava. Fakulta strojní, Katedra obrábění montáže a strojírenské technologie

Diplomová práce se zabývá metodikou dokončovacích procesů pro součásti vyráběné 3D tiskem. Teoretická část se zabývá popisem dokončovací technologie omílání. Podrobně popisuje jednotlivé typy omílacích zařízení a druhy omílacích tělísek. Práce, také obsahuje popis další dokončovací technologie, kterou je tryskání. Dále práce pojednává o technologii 3D tisku a její metodě SLM. V experimentální části práce byly navrženy speciální vzorky, které mají odlišnou mikrogeometrii na každé straně. Vzorky byly na tiskárně vyrobeny při stejných podmínkách tisku, kde variovala pouze strategie skenování. Povrch těchto navržených vzorků byl dále upravován pomocí dokončovací operace tryskání, omílání a následné kombinaci těchto dvou operací. Na základě srovnání jednotlivých operací bylo provedeno vyhodnocení, která dokončovací operace a jaké zvolené parametry při těchto dokončovacích operacích jsou nejvýhodnější z hlediska zlepšení kvality povrchu.

SMOLICHA, T *Technology of finishing processes for components produced by metal 3D printing*: diploma thesis. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava. Faculty of Mechanical Engineering, Department of Assembly Machining and Engineering Technology

The diploma thesis deals with the methodology of finishing processes for components produced by 3D printing. The theoretical part deals with the description of the finishing technology of tumbling. It describes in detail the individual types of tumbling devices and types of tumbling bodies. The work also contains a description of another finishing technology, which is blasting. Furthermore, the work deals with 3D printing technology and its SLM method. In the experimental part of the work, special samples were designed that have different microgeometry on each side. The samples were produced on the printer under the same printing conditions, where only the scanning strategy varied. The surface of these designed samples was further treated by a finishing blasting, tumbling and a subsequent combination of the two operations. Based on the comparison of individual operations, an evaluation was performed which finishing operations and which selected parameters in these finishing operations are the most advantageous from the point of view of improving the surface quality.

Obsah

ÚVOD	9
1. Přehled stávajícího stavu dokončovacích operací	10
2. Stanovené cíle práce	10
3. Omílání	10
3.1 Druhy omílání	11
3.2 Typy omílacích zařízení	12
3.3 Separace omílacích tělísek	18
3.4 Omílací média	19
3.5 Omílací přípravky	21
4. Tryskání	21
4.1 Dělení tryskání	22
4.2 Pneumatické tryskání	23
4.2.1 Injektorové tryskání	23
4.2.2 Tlakové tryskání	24
4.3 Mechanické tryskání	25
4.4 Tryskací médium	26
4.4.1 Dělení tryskacího média	27
4.4.2 Popis nejpoužívanějších tryskacích medií	27
5. Drsnost dle normy ČSN EN ISO 4268	29
6. Technologie 3D tisku SLM	31
6.1 Popis pracovní metody 3D tisku SLM	32
7. Experimentální část práce	34
8. Návrh vzorků	34
8.1 Tisk vzorků	35
8.2 Příprava vzorků	37
9. Aplikace dokončovacích operací	39
9.1 Omílání	39
9.2 Tryskání	41
10. Měření drsnosti povrchu	43

10.1 Měření 2D metodou	43
10.2 Vyhodnocení měření 2D metodou	45
10.3 Měření drsnosti povrchu 3D metodou	50
10.4 Vyhodnocení měření 3D metodou	53
11. Zhodnocení výsledků	56
12. Závěr	58
Zdroje	60
Seznam obrázků	62
Seznam tabulek	64

ÚVOD

Kvalita povrchu strojních součástí je velice důležitá, proto je nutné, aby byly splněny všechny náležitosti, které jsou potřeba k docílení kvalitního povrchu. Proto jsou dokončovací procesy nezbytnou součástí celkové výroby. Zejména u strojní součásti, kde se nejedná jen o její vzhled, ale hlavně také o její funkční vlastnosti, jako například nižší tření, nižší hlučnost atd.

Ve své diplomové práci se zabývám dokončovací operacemi. Na většinu součástí vytisknutých 3D tiskem je potřeba uplatnit dokončovací operaci. Zaměřím se především na proces omílání a tryskání v teoretické části práce se věnuji obecnému popisu těchto metod a v praktické části se zaměřím na analýzu povrchu navržených vzorků, které mají odlišnou mikrogeometrii na každé straně, která je ovlivněná strategií tisku, umístěním vzorků v komoře a úhlem zkosení stran vzorku. Dále byly vzorky podrobeny dokončovací operací tryskáním a omíláním a následnou kombinací těchto dvou operací. Úkolem je zjistit, která dokončovací operace dokáže zajistit, nejkvalitnější povrch. Na základě měření proběhlo vyhodnocení drsností jednotlivých stran povrchů.

Dokončovací operaci na bázi omílání, nahrazuje finančně a fyzicky náročnější manuální práce jako je leštění a broušení, při dosažení stejných kvalitativních výsledků. Omílání je chemicko-mechanický děj, při kterém dochází k relativnímu pohybu omílané součásti a omílacích tělísek, tento pohyb způsobuje tření mezi těmito povrchy a dochází k odlamování otřepů, okují, k zaoblování hran, broušení a leštění povrchu obrobku. Tento proces ovlivňuje mnoho faktorů, jako je volba omílacího zařízení, celkový čas omílání, tvar a velikost omílacích tělísek. Při omílání se používají různé omílací přípravky, které zvyšují celkovou účinnost omílání, zároveň také čistí a odmašťují. Je možné omílat více součástí na jednou současně a tím šetřit celkový čas výroby. Omílání je využíváno v automobilovém, leteckém, farmaceutickém i v klenotnickém průmyslu.

1. Přehled stávajícího stavu dokončovacích operací

Na většinu součástí vyrobených 3D tiskem je nutné uplatnit určitou dokončovací operaci. Součást vytisknutá 3D tiskem může mít různé drsnosti svého povrchu v závislosti na skenovací strategii, umístění v komoře, na úhlu zkosení stran modelu. Součásti mohou být složitějších tvarů, obsahují dutiny nebo hluboké díry, také se na těchto součástech vyskytují dočasné podpory. Proto je nutné zvolit optimální dokončovací úpravu součásti. Z toho důvodu se věnuji popisu dokončovací operaci pomocí omílání a tryskání. [1]

2. Stanovené cíle práce

V Diplomové práci navazuji na Bakalářskou práci studenta Adama Jaška, který se ve své práci zabýval metodami dokončovacích úprav u součástí vytisknutých 3D tiskem. Cílem práce je zlepšit kvalitu povrchu navrhnutého vzorku vytisknutého na 3D tiskárně metodou SLM a zároveň zjistit mikrogeometrii povrchů ze všech stran vzorku, které budou odlišné podle polohy umístění v komoře, úhlu zkosení strany vzorku, povrchy se také budou lišit v závislosti na použití skenovací strategie, v práci se budu zabývat strategií Meander a Stripes. Mikrogeometrii povrchů budu měřit za pomoci 2D a 3D metody měření. Poté budou srovnány drsnosti na referenčních vzorcích bez dokončovací úpravy, zvláště u skenovací strategie Meander a Stripes, dále budu zjišťovat hodnoty 2D a 3D drsnosti po dokončovací operaci omílání po různých omílacích časech, také po dokončovací operaci pomocí tryskání dvěma různými tryskacími médii a nakonec zjistím výslednou mikrogeometrii po kombinaci těchto dvou dokončovacích operací.

3. Omílání

Tato dokončovací operace je chemicko mechanický proces. Princip této operace je takový, že se uvedou do vzájemného pohybu výrobek a omílací tělíska ve vhodném omílacím zařízení. Do omílacího zařízení je možné vložit více výrobků, tímto je možné ušetřit čas.

Omílání je univerzální metoda a je možné s ní řešit více technologických požadavků jako je například zaoblování hran, odstranění otřepů, vyhlazení povrchu a jeho leštění zároveň je také možné odmašťování, čistění, moření.

Omílací zařízení volíme podle velikosti a tvaru výrobku, který budeme omílat. Například pro jeden z nejobvyklejších technologických požadavků tím je odstraňování otřepů je možné použít jednodušší omílací od zařízení jako je kruhový vibrátor přes odstředivé omílací zařízení až po ucelené výrobní linky. Pro zaoblování hran je nutný

vysoký výkon, proto jsou ideální odstředivá zařízení. Tyto zařízení se dají poměrně snadno automatizovat, jejich nevýhodou je poměrně vysoká pořizovací cena a také vyšší náklady na provoz, které vyplývají z velké spotřeby omílacích tělísek. U většiny výrobků je požadován hladký povrch. U dekorativních předmětů je to z důvodu lepšího designu a strojních součástí je to z důvodu lepší funkčnosti jako například u kulových čepů nižší tření, u turbínových lopatek a tryskových motorů je důležitý nižší odpor vzduchu, nižší tření u šnekových převodů, menší hlučnost ložisek atd. V zařízeních pro vlečné broušení je možné v krátkém čase povrchy vyhladit a dále leštit. Leštění se obvykle využívá pro dekorativní předměty, pro komponenty na hudební nástroje, ale také na výrobky používané ve zdravotnictví (kostní implantáty, zpevňovací šrouby). Také je možné leštění použít pro lodní šrouby u sportovních člunů. Tyto omílací operace umožňují nahradit ruční leštění při stejné někdy i lepší kvalitě. [2]

3.1 Druhy omílání

Diskové omílání

Tento proces se provádí v odstředivé nádobě ve tvaru bubnu, výrobky, které potřebujeme obrobit, ponoříme do leštícího granulátu. Leštící granulát se točí v nádobě, pomocí rotujícího dna nádoby. Tato povrchová metoda je zhruba dvacetkrát účinnější než klasické vibrační nádoby. Tento typ povrchové úpravy se hodí hlavně pro malé drobné díly a pro případy kdy potřebujeme upravit více součástí najednou. [3,5]

Vlečné omílání

Tato metoda funguje způsobem, že na speciálních držácích jsou upevněny předměty, které potřebujeme obrobit, tyto předměty jsou vlečeny vysokou rychlostí kruhovou nádobou s omílacími tělísky, vysoká rychlost způsobuje přitlačný tlak mezi předmětem, který obrábíme a omílacími tělísky, tento tlak způsobí opracování obrobku, zejména zaoblení hran, také vyhladí obrobek do lesklé podoby, která se dá srovnat s ručním leštěním. Tato metoda se hodí pro velké a těžké obrobky. [3,5]

Proudové omílání

Při tomto procesu probíhá společný pohyb přípravku, na kterém je upnutý obrobek a obráběcího bubnu. Tyto pohyby způsobují intenzivní sílu opracování, za krátkou dobu. Tato metoda je vhodná pro zaoblení hran u rezných nástrojů, odjehlování a také k leštění. Používá se pro ozubená kola. Tato omílací metoda je vhodná spíše pro jednotlivé kusy. [3,5]

Pulsní omílání

Při tomto procesu je obrobek upnutý v přípravku, který je cyklicky roztáčen do rychlosti více než 2000 ot/min a zastavován a znovu roztáčen. Tyto změny v rychlosti mezi obrobkem a omílacími tělísky, vytvoří velmi silný a kontrolovaný abrazivní účinek. Tato omílací metoda se hodí pro velkosériovou výrobu, integraci do sekvenční výroby, ale také pro jednotlivé kusy. [3,5]

Metoda Trowapast

Pomocí metody Trowapast je možné provádět broušení a leštění současně respektive hned po sobě jako jeden technologický proces. Tento proces probíhá v omílacím stroji, za přítomnosti vibrací, dochází zde k průběžnému společnému pohybu obráběné součásti a omílacích leštících tělísek, nejčastěji to jsou porcelánové válečky do průměru 6 mm, tento proces probíhá za přítomnosti speciálních leštících a brusných minerálních přísad. Během tohoto procesu dochází v první řadě k vyhlazení drsného povrchu, během této činnosti dochází k rozmělnění minerálií, které se změní v leštící prášek. Během omílání je přiváděna do omílací nádoby voda. Ve chvíli kdy dosáhneme požadované drsnosti povrchu, jsou minerálie vyplaveny a omílání probíhá dále za přítomnosti omílacích tělísek a vody. [2,5]

3.2 Typy omílacích zařízení

Zařízení pro proudové omílání

Zařízení na proudové omílání fungují na principu toho, že obrobek je uchycen v přípravku a ponořen do omílacích tělísek, která mají brusný nebo leštící efekt, tělíska jsou umístěny v nádobě, která rotuje. Brusná nebo leštící tělíska se pohybují a toto plynutí tělísek kolem obrobku plus pohyb obrobku vytvoří velmi kvalitní povrch.

Omílací stroje tohoto typu byly vyvinuty zvláště pro procesy, pro které dosud nebyly žádné vhodné metody, pro případy ve kterých je požadováno, dosažení nejvyšší kvality povrchu pro obrobky malých tvarů. Díky vysokým obráběcím silám je možné dosáhnout jemného povrchu i v malých rýhách a drážkách.



Obrázek 1 - Omílací stroj řady SF

Zdroj: <https://advantage-fl.cz/prumysl/povrchova-uprava/omilani/zarizeni-pro-proudove-omilani/rada-sf>

Pro toto zařízení je charakteristické krátká doba při odjehlování, zaoblení hran obrobků a vyleštění do velmi dobré kvality. Zařízení se programují na intervalový pohyb, automatizace je poměrně jednoduchá. V případě, kdy jde použít více než jeden držák nástrojů, dají se měnit obrobky i během procesu. [3,4]

Parametry stroje:

- hmotnost 600 kg - 4 tuny,
- průměr bubnu 780 - 2000 mm
- D x Š x V: od 1620 x 1210 x 2100 mm do 3087 x 2410 x 2600 mm

Je vhodné použití tohoto stroje na plně automatické procesy zaoblování hran a leštění do poměrně vysokého lesku nástrojů z tvrdokovu, fréz, vrtáků, nástrojů používajících se k tváření, ozubených kol a také výstružníků. Toto zařízení má největší uplatnění u výrobců nástrojů, výrobců převodovek, výrobců automobilů a výrobců turbín. [3]



Obrázek 2 - Na levé straně součást před omíláním a na pravé straně po omílání

Zdroj: <https://advantage-fl.cz/prumysl/povrchova-uprava/omilani/zarizeni-pro-proudove-omilani/rada-sf>

Pulsfinish

Pro speciální požadavky linkových výrob v automobilovém průmyslu nebo také pro výrobu nástrojů, byla vyrobena zařízení s pohonem pulshfinish, toto zařízení je poháněno pulsním pohonem, díky tomu je možné plnit vysoké požadavky ve velkovýrobě s ohledem na bezpečnost v procesech.

Princip tohoto procesu je založen na přesně ovládaném pulsním pohonu, který dokáže vytvořit prudce se měnící relativní pohyb mezi obráběnou součástí a obráběcími tělisky. Velkou výhodou tohoto procesu je kvalita obrobeneho povrchu a rychlost.

Tato přídatná jednotka se hodí zejména na odjehlování, zaoblování a vyhlazování. Linie obrobku se dobře udržují. Mezi další výhody patří efektivita s porovnáním s náklady. Zařízení se dá poměrně snadno zabudovat do výrobní linky a může fungovat plně automaticky.

Největší uplatnění tato technologie může získat v prostředích, kde je kladen velký důraz na přesnost, zejména v automobilovém průmyslu u vačkových hřídelí atd. Dále také v nástrojařském průmyslu například k opracování závitníků. [3]



Obrázek 3 - Jednotka Pulsifinish

Zdroj: <https://advantage-fl.cz/prumysl/povrchova-uprava/omilani/zarizeni-pro-proudove-omilani>

Vlečná omílací zařízení

Zařízení využívající tuto metodu omílání vykazují výsledků nejvyšší kvality, získané ve velmi krátkém čase. Výsledkem je přesné zaoblení hran, vyhlazování nebo leštění do vysokého lesku. Tyto výhody jsou nejvíce uplatněni k výrobě nástrojů, které se používají ve farmaceutickém průmyslu.

Omílací technologie tohoto typu, dokáže zaoblit hrany u řezných nástrojů, což způsobí mnohem delší životnost nástroje, vyhlazování a leštění, vylepší funkční vlastnosti nástroje, z toho důvodu je dostačující použít menší řeznou sílu, odstranění kapiček u nástroje způsobí lepší odvod pilin, tuto technologie také lze použít pro odjehlování HSS nástrojů jako například závitníků. Zařízení na principu vlečného omílání existují ve více verzích přizpůsobených specifickým požadavkům na trhu.

Parametry stroje:

Hmotnost se pohybuje od 300kg do 850kg

D x Š x V: od 1155 x 970 x 2010 mm do 1650 x 1300 x 2450 mm

Objem omílacího bubnu je od 80l do 170l

Největší využití je v nástrojařském průmyslu, zdravotnickém průmyslu a také klenotnickém průmyslu. [3]

Disková odstředivá zařízení

Omílací stroje tohoto typu jsou vhodné hlavně pro obrobky malých velikostí. Obráběny jsou ve větších množstvích v omílacích bubnech. Vhodné výrobky pro obrábění jsou šperky, také soustružené a frézované a ražené díly. Tato omílací zařízení fungují na principu diskového odstředování, je možné v nich obrábět jak za sucha, tak za mokra nebo za použití olejů, v závislosti na typech obrobků.

Mezi hlavní rysy tohoto zařízení patří rychlý a spolehlivý reprodukovatelný proces. Rozsáhlé možnosti využití od odjehlování po leštění. Toto zařízení pracuje až dvacetkrát efektivněji než klasická vibrační zařízení. Hmotnost tohoto zařízení se pohybuje v rozmezích od 120kg do 1050kg. Objemy bubnů jsou od 1 × 9 litrů do 4 × 50 litrů. Tyto zařízení jsou konstruovány jako volně stojící stroje a také jako poloautomatická zařízení.

Tyto typy zařízení mají největší přínos pro zdravotnický průmysl (implantáty, plastiky, zubní aplikace) dále také pro klenotnický průmysl (pro většinu materiálů, které se v tomto průmyslu uplatňují, včetně drahých kamenů). Také je možné tato zařízení požit na neželezné materiály jakou jsou tvrdé pryže, plasty, keramika a tak dále. Údržba tohoto stroje není náročná.

Mezi technické vlastnosti toho zařízení patří, možnost nastavení mezery omílací nádoby pomocí seřizovacího šroubu, tato nastavení umožňují obrábět i tenké obrobky o tloušťce 3mm bez toho aby v mezeře uvízly. Nastavení tímto seřizovacím šroubem je rychlé a snadno se dá aplikovat. Toto zařízení se hodí nejvíce pro soustružené a frézované díly.

Existují také zařízení, která umožní použít více různých metod pouze s jedním strojem. Zařízení může fungovat v provedení magnetickém, mokrém a suchém. Hodí se zejména pro odstranění stop po broušení. Kvalita povrchu je srovnatelná s kvalitou ručního opracování. Tyto zařízení se nejvíce uplatňují ve zdravotnickém průmyslu a klenotnickém průmyslu. [3,4]



Obrázek 4 - Omílací stroj z řady eco

Zdroj: <https://advantage-fl.cz/prumysl/povrchova-uprava/omilani/diskova-odstrediva-zarizeni/rada-eco-maxi>

Vibrační žlab

Tento vibrační žlab umožňuje jemné, ale silné obrábění povrchů. Hodí se zejména pro dlouhé a tenké obrobky. Je určený pro strojní inženýrství jako například protahováky a také pro zdravotnický průmysl například pro kostní hřeby. [3]



Obrázek 5 - Vibrační žlab HV20

Zdroj: <https://advantage-fl.cz/prumysl/povrchova-uprava/omilani/zlabove-vibratory/zlabovy-vibrator-hv-20>

3.3 Separace omílacích tělísek

Při omílání je velmi důležitá separace obrobků od omílacích tělísek. Pro lepší oddělení je vhodné, když je rozdílná velikost obrobků od omílacích tělísek. Obráběné materiály, které jsou magnetické, lze oddělit magnetickou separační metodou. [4]

Standartní separace

Standartní separace je prováděna za pomoci děrované desky, na které se oddělí omílací tělíska od obrobku. Je nezbytné, aby součást, kterou obrábíme, měla větší rozměry než jsou díry v základní desce. [4,5]



Obrázek 6 - Separace standartní

Zdroj: <http://omilani.cz/prostredky-pro-omilani>

Prutová separace

Pro správné fungování tohoto stroje je nutné, aby obrobky měly větší rozměry než mezery mezi pruty. Těmito podélnými otvory propadnou omílací tělíska do pracovní nádoby. Poté se obrobky mechanicky nebo ručně vyndají z oblasti prutů. [4,5]



Obrázek 7 - Separace prutová

Zdroj: <http://omilani.cz/prostredky-pro-omilani>

Magnetická separace

Tuto separaci je možné použít pouze u součástí, které jsou magnetické. Feritické obrobky jsou přitaženy k silnému magnetu a vytaženy z omílacího zařízení, poté se přemístí na jiné místo, kde je možné s nimi dále pracovat. Na tomto místě probíhá demagnetizace obrobků. [4,5]



Obrázek 8 - Magnetická separace

Zdroj: <http://omilani.cz/prostredky-pro-omilani>

2.4 Omílací média

Omílací tělíska jsou jedním z klíčových faktorů při omílání. Je důležité zvolit pro určité povrchové operace vhodné obráběcí tělíska. Omílací tělíska mají největší podíl pro finální podobu obrobku. Určení vhodného materiálu pro obráběcí tělíska je velmi důležitou volbou. Velikost zvolených tělísek ovlivňuje drsnost povrchu. Větší omílací tělíska způsobují větší brusný efekt a povrch obráběného tělesa bude hrubší. Omílací tělíska nejsou jediným obráběcím médiem. Omílání probíhá většinou za přítomnosti procesních kapalin. [20]



Obrázek 9 - Omílací médium

Zdroj: <https://advantage-fl.cz/storage/files/362/OTEC-Maschinenuebersicht-CZ.pdf>

Různé druhy materiálů pro omílací tělíska:

- plastové materiály
- keremické materiály
- nerezové materiály
- zirkonové kuličky
- ušlechtilé oceli
- skleněné materiály.

Možné tvary omílacích tělísek:

- kuličkové tvary
- satelitní tvary
- válečkové tvary
- trojhránkové tvary
- kuželové tvary
- jehličkové tvary
- hvězdicovité tvary. [20]

Leštění omíláním

Pokud je potřeba dosáhnout leštění pomocí omílání je vhodné zvolit jako omílací tělíska kuličky, tímto tvarem je možné obrobky leštit. Nehodí se hranaté obráběcí tělíska, hrany mohou těleso lehce poškodit.

Nejčastěji využívané materiály k leštění jsou keramické nebo skleněné kuličky, největší účinnost má nerezová ocel. [4,5]

Odstranění otřepů

Proto operaci platí pravý opak než u leštění, jsou výhodnější omílací tělíska, která mají složitější tvar, jakou jsou například kužely, hvězdice, satelity, válečky nebo také trojhránky.

Jeden z hlavních faktorů při volbě materiálu omílacích tělesík je finanční náročnost použitého materiálu. Poměrně za příznivou cenu jsou materiály z keramiky, ale nemají nejlepší účinnost. Větší účinnost mají omílací tělíska z ušlechtilé oceli, nevýhodou těchto tělísek je větší finanční náročnost. [4,5]

Slepení tenkých plochých obrobků

Při omílání tenkých plochých obrobků, může docházet k jejich vzájemnému slepení, tento jev je nežádoucí, kvůli nedostatečnému obrobení všech stran. Dá se tomuto slepení

předejít za pomoci mikro plastových kuliček, které zamezí slepení obráběného materiálu k sobě. [4,5]

3.5 Omílací přípravky

Omílací přípravky, nebo-li také compoundy, jsou přípravky, které jsou přidávány společně s vodou a zajišťují lepší účinnost omílacího procesu, zároveň tento proces zrychlují. Tyto přípravky se volí v závislosti na druhu obráběného materiálu a podle požadavku na kvalitu povrchu. Přípravky jsou přidávány jako kapalina nebo jako práškový omílací přípravek. Tyto přípravky dělíme podle jejich zásaditosti nebo kyselosti.

Svou roli zde hraje také ekologie, dali by se použít i účinnější přípravky, ale jejich ekologická odbouratelnost je náročná, proto jsou spíše používány organické směsi, které je jednodušší biologicky odbourat. Kyselé, nebo zásadité směsi ne jenom zvyšují účinnost omílání, ale také mají konzervační schopnosti, obrobek je více odolný proti korozi. U kyselých přípravku se pohybuje jejich pH mezi 3 – 5 u zásaditých přípravků se hodnota pH pohybuje mezi 8 – 9,5. [4,5]

4. Tryskání

Technologie tryskání je jednou z nejčastěji používaných mechanických úprav povrchu. Jde o proces při kterém se opracovává povrch materiálu proudem tryskacího media, které je na povrch vrženo pomocí stlačeného vzduchu, metacího kola, nebo kombinací tlaku vzduchu a vody. Tímto způsobem vržené tryskací médium dopadá na povrch opracovávaného materiálu s určitou mírou kinetické energie pod určitým úhlem s určitou vzdáleností. Kvalitu očištění ovlivňuje velikost a tvar zrn, jejich kinetická energie, druh opracovávaného materiálu, na úhlu dopadu a vzdálenosti od povrchu opracovávané součásti. [9,11]



Obrázek 10 - Ocelový granulát

Zdroj: <https://www.h-glost.cz/tryskaci-prostredky>

Ocelový granulát (Obrázek 10) je zušlechťený ocelový granulát, jeho struktura je homogenní, je to temperovaný martenzit. Jeho tvrdost je 450 – 560 HV, poróznost do 10% a hustota 7 200kg/m³. Tento materiál je optimální pro většinu aplikací využívajících tryskání pomocí metacích kol.

Nejčastěji používaná obráběcí media jsou abrazivní částice, jako jsou ocelová drť, ocelový granulát nebo sekaný drát, křemičitý písek, korund, drť z bílé litiny, struska. Během tryskání ostrými tryskacími prostředky dochází k většímu opracování materiálu, z důvodu vysekávání kousků částic z opracovávaného materiálu. Při dopadu tryskacího média je obráběný materiál zbavován nečistot a částí vrstev. Po tomto obráběcím procesu má povrch určitou drsnost a čistotu povrchu. Při použití kulatých zrn, je úběr materiálu menší. Povrch po takové úpravě je více odolný proti korozi.

Technologický postup tryskání:

- Před zahájením tryskání je potřeba předměty připravit, pokud jsou mastné je dobré je odmastit, nebo na hrubo očistit
- Takto připravené součásti se upevní na závěsy do tryskače''
- Tímto může začít tryskání součástí, pomocí vhodného tryskacího média
- Po tryskání je nutné povrch očistit, kartáčem nebo stlačeným vzduchem
- Dalším krokem je ochrana proti korozi, nanesením ochranného povlaku

Typ tryskacího média se volí podle povrchu opracovávané součásti, úrovně znečištění, tvrdosti obráběného materiálu a podle tloušťky. Součásti z měkčích materiálů se tryskají nižším tlakem a méně hrubými zrny. [6,11]

Výkon tryskání ovlivňuje:

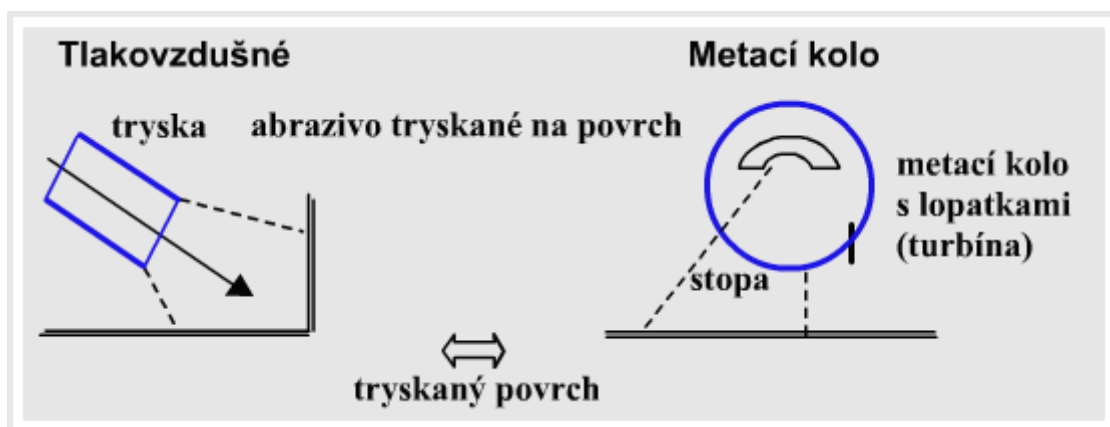
- Materiál a druh tryskacího media
- Velikostí abrazivních částic
- Tlak vzduchu nebo otáčky metacího kola
- Úhel dopadu tryskacího media
- Vzdálenost obráběného předmětu od trysky nebo metacího kola[6,11]

4.1 Dělení tryskání

Tryskání se dělí podle typu vržení tryskacího média na obráběnou součást, dělí se na dva způsoby:

- Pneumatické tryskání – vrhání abrazivních částic na povrch tryskaného materiálu pomocí stlačeného vzduchu

- Mechanické trykání – metání abrazivních částic na povrch materiálu pomocí lopatek metacích kol [10,11]



Obrázek 11 - Tlakovzdušné a metací tryskáci zařízení

Zdroj: <https://www.taltech.cz/otryskani-povrchu>

4.2 Pneumatické trykání

Pro pneumatické trykání je charakteristické, vrhání tryskáčím média, na povrch materiálu, pomocí proudu stlačeného vzduchu. Používaný tlak vzduchu se pohybuje rozmezí hodnot 0,2 až 0,8 MPa. Tato směs abrazivních částic a vzduchu je vrhána na povrch otryskávaného materiálu pomocí trysky.

Pneumatické trykání má poměrně široké využití, protože je možné tímto způsobem opracovávat tvarově velmi složité součásti a také se mohou přizpůsobit různým druhům požadavků při aplikacích. Výhodou této mechanické úpravy je, možnost trykat těžko dostupná místa. [6,9,10]

Pneumatické trykání se podle konstrukčního řešení dále dělí na:

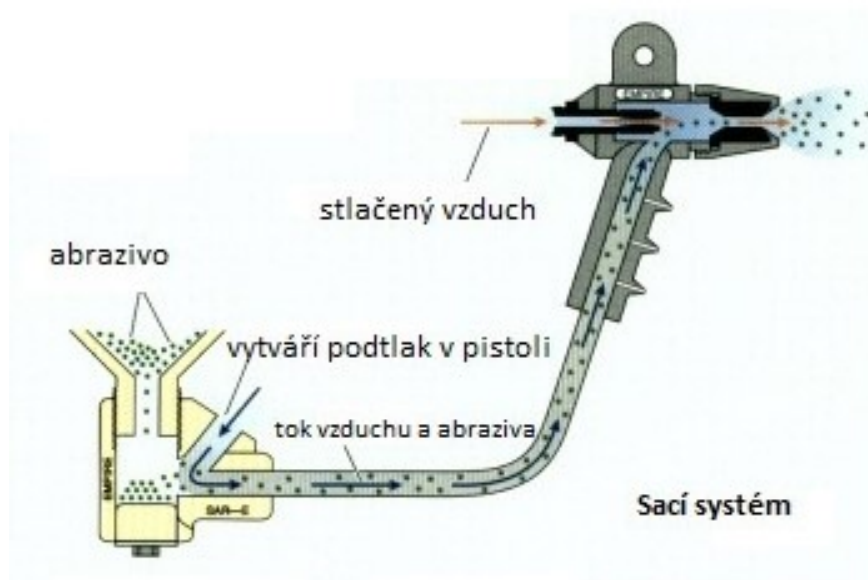
- Injektorové sací trykání
- Tlakové trykání

4.2.1 Injektorové trykání

Injektorové trykání funguje za pomoci stlačeného vzduchu v komoře. Pomocí zpětného tlaku je tryskáčím médium vháněno do tryskáčích pistole, zde proběhne smíchání abraziva se vzduchem. Tato směs je trykána pomocí trysky na povrch součásti.

Při trykání pneumatickými tryskači, není tryskáčím médium vrženo na povrch příliš velkými rychlostmi. Z důvodu menších výstupních rychlostí, je vhodné používat spíše lehčí abrazivní materiál jako například korund, granát nebo přírodní organické materiály.

Mezi nevýhody této metody patří nižší výkon, který je způsobený nižší výstupní rychlostí tryskacího média, ale pracovní cyklus u této metody je daleko plynulejší než například u tlakové metody. Další výhodou může být jednoduché konstrukční řešení a dobrá regulace intenzity tryskání pomocí velikosti trysky, průtoku abraziva, tlakem vzduchu. Tryskání pomocí injektorového způsobu je využíváno hlavně při menších pracovních objemech. [9,10,11]

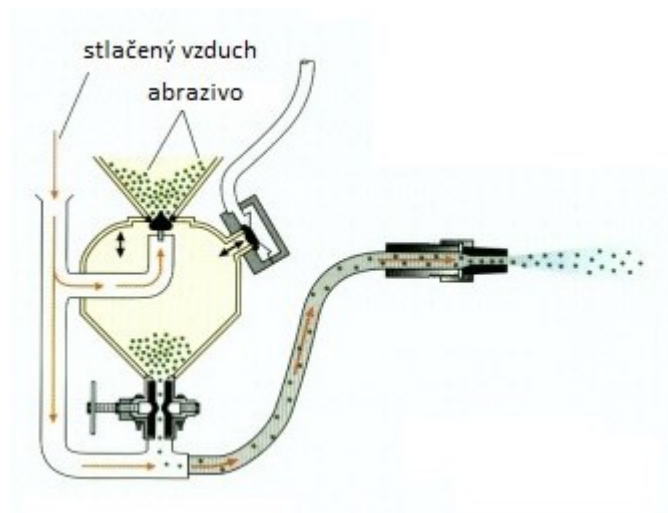


Obrázek 12 - Injektorový systém

Zdroj: <https://www.piskovacka.cz/info-82-co-je-piskovani-cim-se-piskuje/>

4.2.2 Tlakové tryskání

Tato metoda je založena na zařízení, které se skládá z tlakové nádoby, do této nádoby je přiváděn stlačený vzduch, tato nádoba slouží zároveň jako zásobník tryskacího média. Na dně tlakové nádoby se nachází směšovací komora, ve které je tryskací médium urychlováno stlačeným vzduchem. Ve spodní části nádoby je ventil, který po otevření propustí směs tryskacího média a vzduchu do trysky. V trysce dochází k expanzi vzduchu a dojde k urychlení abraziva, které je vrháno na povrch. [11,15]



Obrázek 13 - Tlakový systém

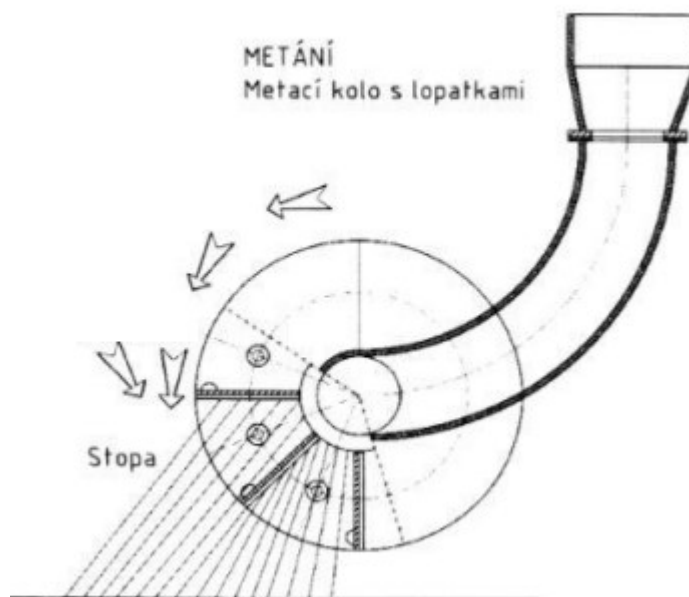
Zdroj: <https://www.piskovacka.cz/info-82-co-je-piskovani-cim-se-piskuje/>

Mezi nevýhody tlakového tryskání patří, nutné přerušování procesu, kvůli doplnění zásobníku tryskacím médiem. Jakmile dojde k vyprázdnění zásobníku, je nutné zavřít přívod stlačeného vzduchu a horním plněním doplnit tryskací medium do tlakové nádoby. Tento způsob tryskání je až třikrát nebo čtyřikrát účinnější, než injektorový způsob, z toho důvodu je tento způsob užívaný k čištění mechanických nečistot, odstraňování okují, korozních produktů. Je nutné mít k této metodě dobrý kompresor. [6,10]

4.3 Mechanické tryskání

Mechanické tryskání je prováděno pomocí metacího kola. Je to výkonnější způsob než injektorové tryskání. Tyto mechanické tryskače, využívají, energii rotujícího metacího kola s lopatkami, na okraj lopatek je přiváděno tryskací medium, které je posouváno pomocí odstředivé síly, na kraj lopatek, odkud je abrazivum vrženo vysokou rychlostí proti povrchu materiálu.

Součtem obvodové a odstředivé rychlosti je dána výstupní rychlost abrazivního materiálu, dosahuje rychlostí až 100 m/s. Výkon touto metodou tryskání je daleko vyšší než pomocí pneumatického tryskání, zároveň je i šetrnější. [6,10]



Obrázek 14 - Metací kolo

4.4 Tryskací médium

Tryskací médium má funkci nástroje. Jde o sypký materiál složený z pevných částic. Vlastnosti tryskacího média lze rozdělit takto:

Základní vlastnosti:

- Typ materiálu
- Tvar abraziva
- Velikost abrazivního materiálu
- Odolnost abraziva proti opotřebení

Mechanické vlastnosti:

- Tvrdost
- Pevnost

Technologické vlastnosti:

- Schopnost odstraňování materiálu
- Zdrsňující efekt

Při volbě tryskacího média, jsou jisté činitele, které je potřeba brát v potaz při výběru tj. chemické složení, tvrdost, hustota, tvar, velikost a také mechanické vlastnosti součásti, kterou tryskáme. Výběr tryskacího média ovlivňuje konečné vlastnosti upravovaného povrchu materiálu a na účinnost tryskání a to i z pohledu šetrnosti. Zároveň to také ovlivňuje životnost tryskacích zařízení. [9,10,11]

4.4.1 Dělení tryskacího média

Rozdělit tryskací médium můžeme podle materiálu, ze kterého je tryskací médium vyrobeno na kovové a nekovové. Dále je můžeme rozdělit podle zdroje, odkud pochází na přírodní a syntetické. Dále jsou děleny podle tvaru abrazivního materiálu, ostrá zrna (drtě) nebo oblé zrna (granuláty). [10,11]

Kovové tryskací prostředky jsou:

- Ocelový granulát
- Ocelová struska
- Nasekaný drát
- Litinové zrna – granulát, drť
- Nerezová zrna – granulát, drť

Nekovové tryskací prostředky jsou:

Syntetické:

- Umělý korund
- Skleněné kuličky
- Drcené sklo
- Strusky
- Plastové abrazivo
- Keramický granulát
- Suchý led

Přírodní:

- Křemičitý písek
- Granát
- Přírodní korund
- Zirkon
- Rozdrcený vápenec
- Rozdrcené pecky [11]

4.4.2 Popis nejpoužívanějších tryskacích medií

Ocelový granulát

Je vyrobený ze speciálně upravené oceli. Jeho struktura je homogenní z temperovaného martenzitu, tato struktura má dobrý vliv na pružnost a únavu materiálu. Tento typ tryskacího média se hodí pro tryskání metacím kolem. Výhodou tohoto tryskacího média je dlouhá životnost, odolnost proti nárazům. [6,15]



Obrázek 15 - Ocelový granulát

Zdroj: <https://www.comprexcz.cz/tryskaci-materialy/ocelovy-granulat.html>

Tabulka 1 - Chemické složení ocelového granulátu

Chemické složení	Označení	Tvrdost
C 0,75 - 1,20%	S	
Mn 0,60 – 1,10%		460HV
Si 0,60 – 1,10%		-
P max 0,04%		560HV
S max 0,04%		

Ocelová drť

Jedná se o ostrohranný tryskací materiál, který se používá v tryskacích zařízeních s metacími koly. Používá se pro čištění a úpravu povrchu. [11]



Obrázek 16 - Ocelová drť

Zdroj: <https://www.comprexcz.cz/tryskaci-materialy/ocelova-drt.html>

Tabulka 2 - Chemické složení ocelové drti

Chemické složení	Označení	Tvrdost
C – 0,75-1,2 %	GP	450 – 560 HV
Mn – 0,5-1,1 %	GL	600 – 700 HV

Si – 0,5-1,1 % P – max 0,04 % S – max 0,04 %	GH	800 – 950 HV
--	----	--------------

5. Drsnost dle normy ČSN EN ISO 4268

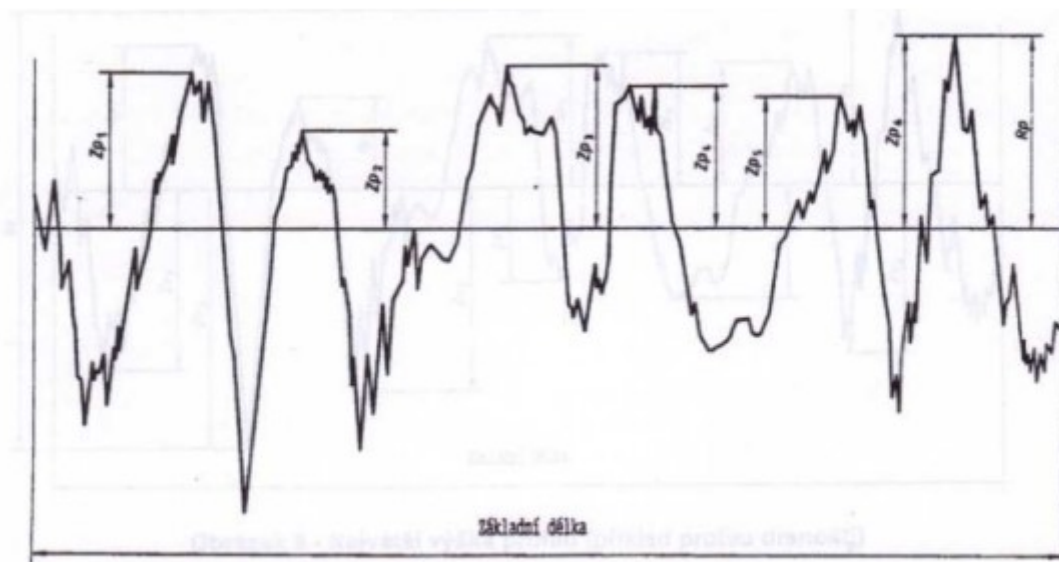
Souhrn nerovností povrchů se nazývá drsností. Nerovnosti jsou relativně v malé vzdálenosti, většinou vznikají při výrobě, vady povrchu se jako drsnost nepočítají.

K vyhodnocení drsnosti se používají normalizované parametry, které jsou určeny pro dvourozměrné měření. Parametry jsou určeny dle normy ČSN EN ISO 4287 a dělí se do třech skupin. Tyto skupiny jsou

- P-parametry – tyto parametry se počítají ze základního profilu
- R-parametry – tyto parametry drsnosti, se počítají z profilu drsnosti
- W-parametry – tyto parametry vlnitosti, se vypočítají z profilu vlnitosti

R-parametry

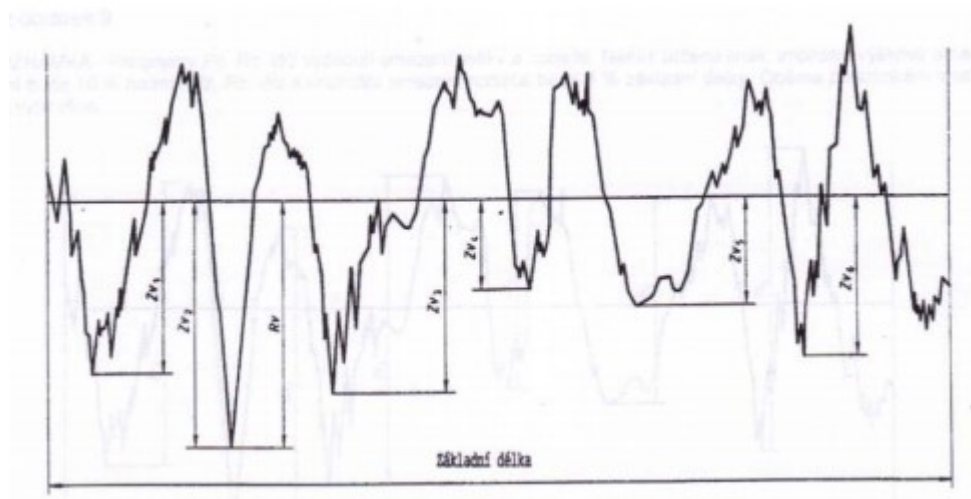
Nejvyšší výška výstupku profilu R_p je nejvyšší výška výstupků profilu Z_p v rozsahu základní délky l_v . Kde Z_p je definováno jako vzdálenost mezi střední čarou a nejvyšším bodem profilu.



Obrázek 17 - Nejvyšší výška profilu drsnosti R_p

Zdroj: ČSN EN ISO 4287

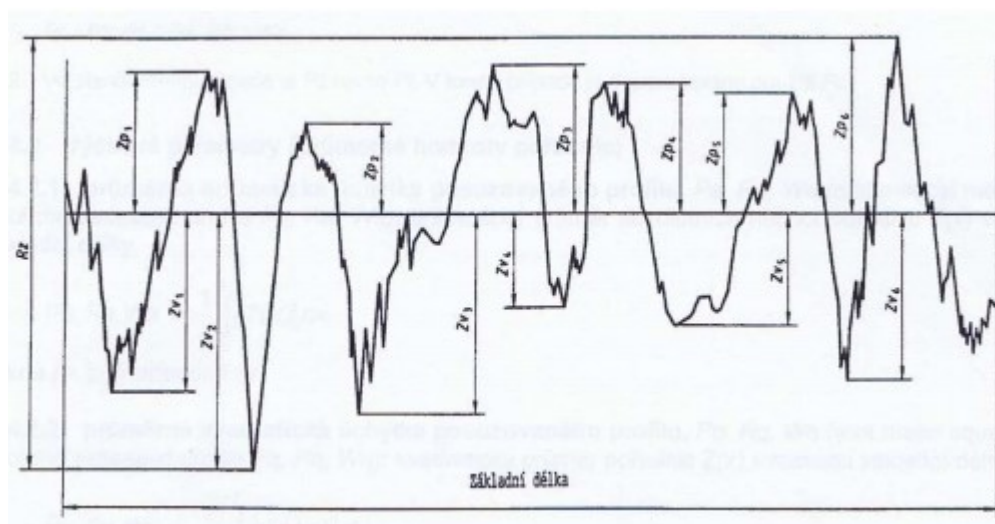
Největší hloubka prohlubně profilu R_v – je délka Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozmezí základní délky l_v . Kde Z_v je definováno jako vzdálenost mezi střední čarou a nejnižším bodem prohlubně profilu. [7,8]



Obrázek 18 - Nejhlubší prohlubně profilu

Zdroj: ČSN EN ISO 4287

Nejvyšší výška profilu R_z – je součet nejvyššího výstupku Z_p a nejhlubší prohlubně profilu Z_v v rozsahu základní délky l_v .



Obrázek 19 - Nejvyšší výška profilu drsnosti

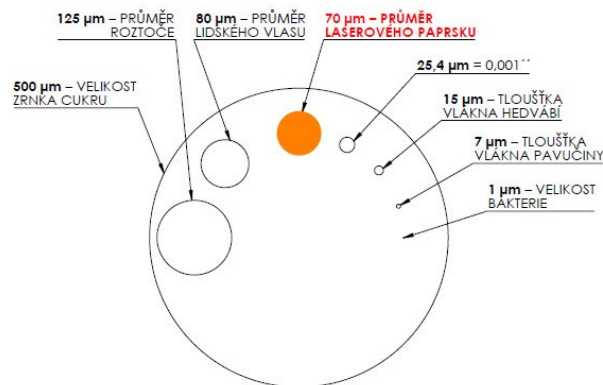
Zdroj: ČSN EN ISO 4287

Průměrná výška profilu prvku R_c – je průměrná hodnota výšek Z_t prvků profilu v rozsahu základní délky. Výška profilu Z_t je definována jako součet výšky výstupku a hloubky prohlubně prvku profilu.

Celková výška profilu R_t je součet nejvyššího výstupku profilu Z_p a nejnižší prohlubně profilu Z_v v rozsahu vyhodnocované délky l_n . [7,8]

6. Technologie 3D tisku SLM

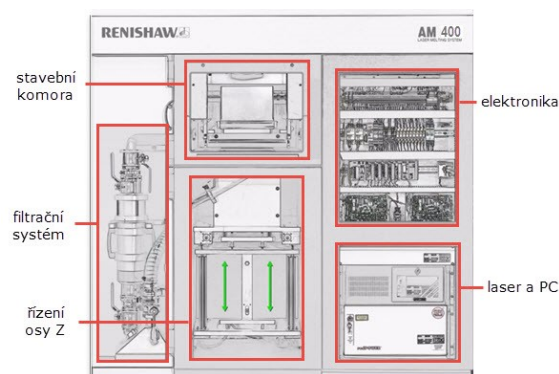
Selektivní laserové tavení (Selective Laser Melting) práškových kovů. Jedná se o jednu z metod 3D tisku používanou k tisku kovových součástí. Tato metoda funguje na principu tavení prášku pomocí vysoce výkonného laseru nebo elektronového paprsku, tento zdroj tepla taví prášek, který je nanášený na základní desku (platformu). Průměr paprsku je zhruba kolem 70 mikrometrů. Vrstvy prášku se pohybují v rozmezí tloušťky 20 až 100 mikrometrů, zaleží na druhu použitého práškového kovu. [12]



Obrázek 20 - Srovnání průměru laserového paprsku

Zdroj: <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/>

Většinou se zařízení na 3D tisk kovových součástí skládá ze stavební kamery, systému, který slouží k filtraci, mechanismů, který slouží k pohybu po platformě v ose Z, elektronických částí, laseru se sestavou zrcátek a počítače. [12]

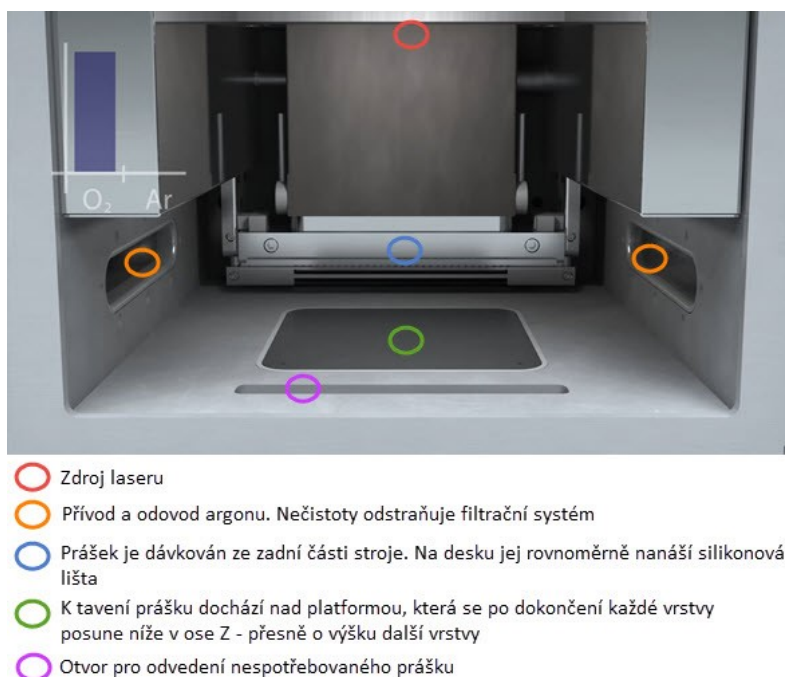


Obrázek 21 - Schéma systému Renishaw AM400

Zdroj: <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/>

6.1 Popis pracovní metody 3D tisku SLM

K tavení práškového kovu dochází v striktně regulované atmosféře. V komoře, ve které probíhá tisk, je před zahájením tisku vytvořeno téměř stoprocentní vakuum a nulová vlhkost. Komora je vyplněna plynem argonem, nebo dusíkem. Argon má vyšší protonové číslo a má větší hmotnost než dusík, je výhodnější ho použít, z důvodu lepší účinnosti. Větší hmotností argonu je způsobeno, vytlačení zbytkového vzduchu. Koncentrace kyslíku se pohybuje pod 0,1%. Spotřeba argonu je v průměru 50 litrů za hodinu. [12,22]



Obrázek 22 - Popis pracovní komory zařízení Renishaw AM 400

Zdroj: <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/>

Po proběhnutí přípravné fáze a nastavené platformy před zahájením 3D tisku je ze zásobníku nasypán kovový prášek, tento kovový prášek je nanášen pomocí planžety se silikonovou lištou. Dále následuje tavení vrstvy naneseného prášku pomocí laseru podle připraveného výrobního programu.

Výška vrstvy kovového prášku se odvíjí od nastavení parametrů a na druhu použitého prášku. Pro materiál z korozivzdorné oceli se standardně volí výška vrstvy 50 mikrometrů. Směřování paprsku v osách X a Y je za pomoci dvou vysokofrekvenčních zrcátek. Pokaždé při dokončení jednotlivé vrstvy se platforma posune v ose Z o výšku dané vrstvy, takto se opakuje celý proces, dokud není model hotový. [12,22]



Obrázek 23 - Nepoužitý prášek okolo tištěného modelu

Zdroj: <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/>

Ve chvíli kdy zařízení dokončí tisk, je kontaminovaný prášek, odsán za pomoci vysavače. Prášek, který nebyl v procesu nataven a zároveň obstupuje vytištěný model se smete do otvoru, ze kterého putuje do nádob určených pro manipulaci s práškem, tyto nádoby jsou umístěny ve spodní části zařízení. [12]



Obrázek 24 - Prosévací zařízení na prášek

Zdroj: <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/>

Pomocí prosévacího zařízení je prášek zpracován k dalším použitím. Tento proces není možný u všech aplikací, například pro medicínské účely, je nutné používat pouze čistý

prášek, který nebyl nikdy předtím použit. Při vícenásobném použití je možná jistá kontaminace prášku.

Po ometení a očištění zbylého prášku z komory se vyjme základní deska, na které je připevněn model. Sestava je oddělena z platformy pomocí pásové pily nebo také elektroerozivním obráběcím drátem. Na základní desce zůstanou pozůstatky modelu a podpor, tyto zbylé části se obrobí frézováním a konečná úprava povrchu je dokončena broušením na plocho.

Po oddělení modelu od platformy, následují další technologické operace, které závisí na požadovaných vlastnostech vytisknuté součásti. V praktické části práce se budu zabývat konkrétně dokončovací operací pomocí omílání a tryskání. [12,22]

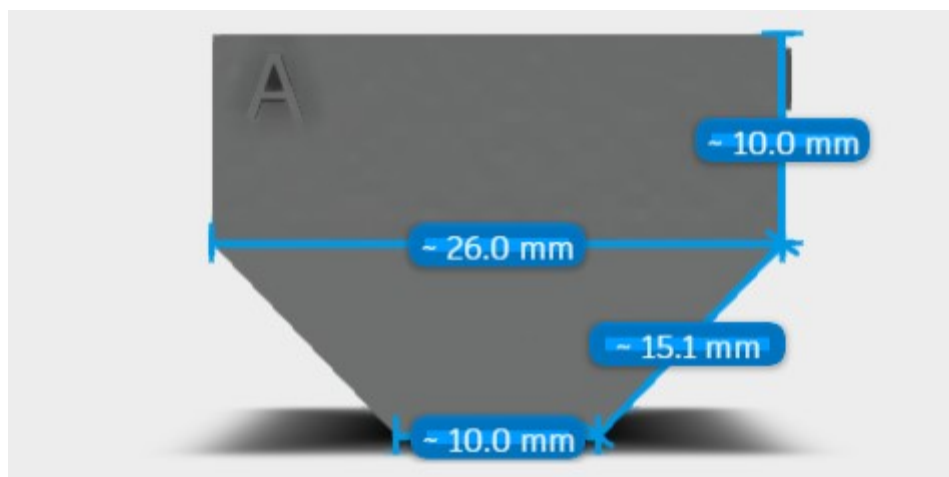
7. Experimentální část práce

V této části práce jsem se zabýval přípravou a následnou výrobou referenčních vzorků pro experiment, dále jsem se věnoval samotnému experimentu a následně vyhodnotil výsledky experimentu.

8. Návrh vzorků

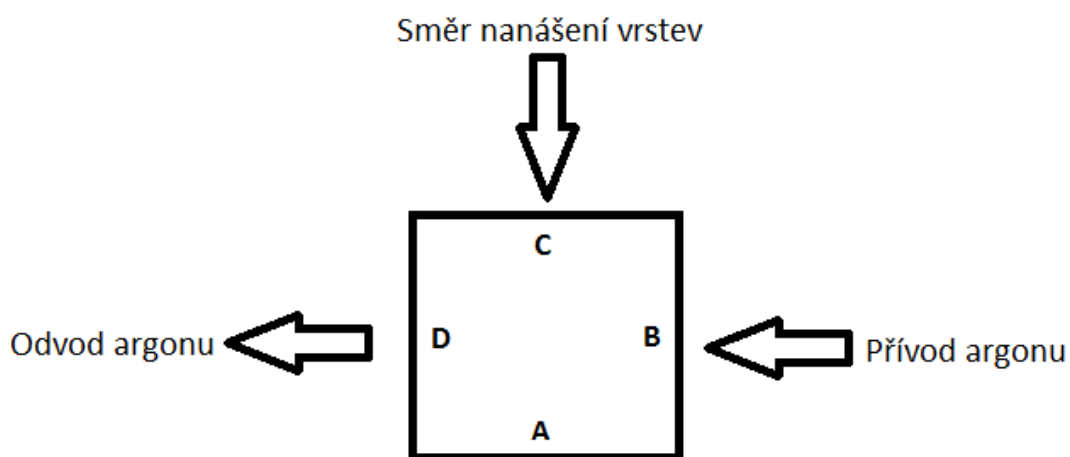
Jako referenční vzorek jsme zvolili komolý jehlan. Nejprve jsme vytvořili trojrozměrný CAD model, který jsme uložili ve formátu STL, tento trojrozměrný CAD model slouží jako vstupní informace pro 3D tisk. Rozměry vzorku jsme navrhli tak, aby se dala optimálně změřit mikrogeometrie povrchu. Velikost úhlu svírajících stran je 45° , zvolili jsme tuto velikost úhlu, protože je to takzvaný kritický úhel, nejhorší varianta, poslední možný úhel který, je možný vytisknout bez podpor. Každá strana vzorku bude mít odlišnou mikrogeometrii. Celkový počet vzorků je 16 kusů.

Materiál, ze kterého jsou vzorky vyrobeny je AISI 316L nemagnetická austenitická korozivzdorná ocel, tato ocel obsahuje velmi nízký obsah uhlíku, legující prvky jsou chrom, nikl, molybden. Tato ocel je dobře svařitelná a má vysokou pevnost. Tento materiál je možné využívat v chemickém, potravinářském a také v leteckém průmyslu. Materiál je dodán od firmy Renishaw ve formě práškového kovu, velikost jednotlivých zrn je $45 \pm 15 \mu\text{m}$. Práškový kov je dodáván v nádobách, které jsou k tomu určeny, je vhodné kovový prášek skladovat na suchém místě. Kovový prášek je vyrobený pomocí metody plynové atomizace. [13]



Obrázek 25 - 3D model referenčního vzorku

Zdroj: Program Autodesk Inventor Professional 2019



Obrázek 26 - Schéma vzorku

Schéma je zde znázorněno, z důvodu toho, že vzorek může mít z každé strany jinou mikrogeometrii povrchu, z pravé strany je povrch ovlivněný přívodem argonu a z levé strany je ovlivněn odvodem argonu, zadní stranu vzorku ovlivňuje směr nanášení vrstev.

8.1 Tisk vzorků

Pro tisk vzorků jsme použili zařízení od firmy Renishaw AM400, tato firma je výrobcem 3D tiskáren sídlící v Anglii. Verze AM400 je novější a lepší verze, tiskárny AM250, tato novější verze obsahuje vylepšený řídicí systém optiky, také je zde změněno proudění plynu, ochrana okna a nový 400w optický systém s vláknový laserem. Hmotnost tohoto zařízení je 1225 kg. Hlučnost tiskárny během tisku je 67 dB. Průměr laserového paprsku je 70 μm . Tloušťka nanesené vrstvy je od 20 μm do 100 μm . Inertní plyn v systému je argon, který snižuje hladinu kyslíku v komoře. K tiskárně jsou připojeny další

zařízení jako je chladicí jednotka, odvlhčovač vzduchu, mokrý odlučovač, nádoby pro kovový prášek, prosévací zařízení a čidlo, které slouží k detekci úniku inertního plynu. [22]

Každá strana vzorků má odlišnou mikrogeometrii povrchu, tyto vlastnosti může ovlivnit nanášecí strategie. K tisku našich vzorků jsme použili strategii Meander pomocí, které bylo vytištěno 8 vzorků a dalších 8 vzorků pomocí strategie Stripes. Další věc, která má vliv na kvalitu povrchu vzorku je výkon laseru, dále také může ovlivnit kvalitu vzorku argon, který proudí zprava do leva, to může způsobit, že pravá strana vzorku má odlišné vlastnosti než levá. Dalším atributem, který má vliv na kvalitu povrchu je úhel zkosení stran. [12,21]

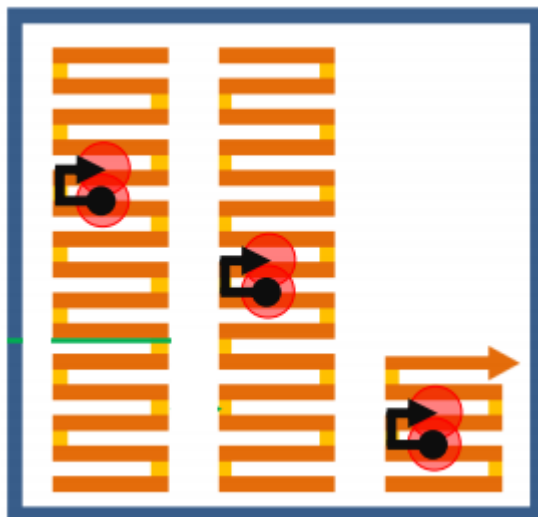


Obrázek 27 - Zařízení AM400 od firmy Renishaw

Tisk všech vzorků probíhal najednou, na jedné platformě, po každém dokončení jednotlivé vrstvy se platforma posune směrem dolů ve směru osy Z o velikost výšky další vrstvy. Tisk všech vzorků trval dohromady 16hodin a 50minut. Hmotnost jednoho vzorku je 81,3 gramů. [21,22]

Skenovací strategie Stripes

Pomocí této strategie tisku bylo vytištěno 8 vzorků. Dráha laseru je tvořena přerušovanými pásy. Skenovací úseky jsou kratší, to má za vliv snížení koncentrace zbytkových napětí. Pomocí této strategie je možné tisknout rychleji, než u šachovnicové skenovací metody. Tato metoda je vhodná pro objemové součásti.

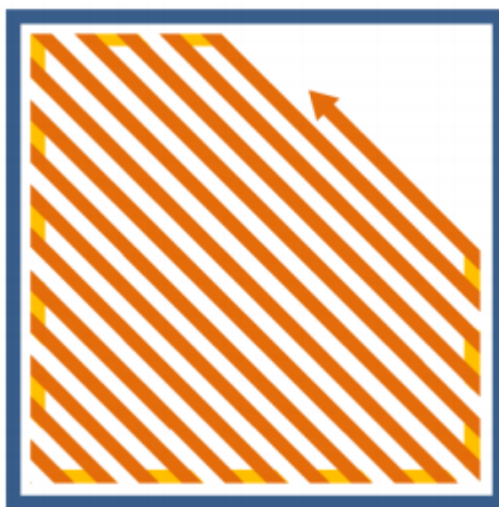


Obrázek 28 - Skenovací strategie Stripes

Zdroj: <https://www.renishaw.cz/cs/am-guide--41140>

Skenovací strategie Meander

Tato strategie tisku je vhodná zejména pro tenkostěnné součásti menších rozměrů, při této strategii skenovací vektory nedosahují velkých vzdáleností. Tato skenovací strategie je poměrně rychlá. Nekonzistentní distribuce tepla skrz každou vrstvu.



Obrázek 29 - Skenovací strategie Meander

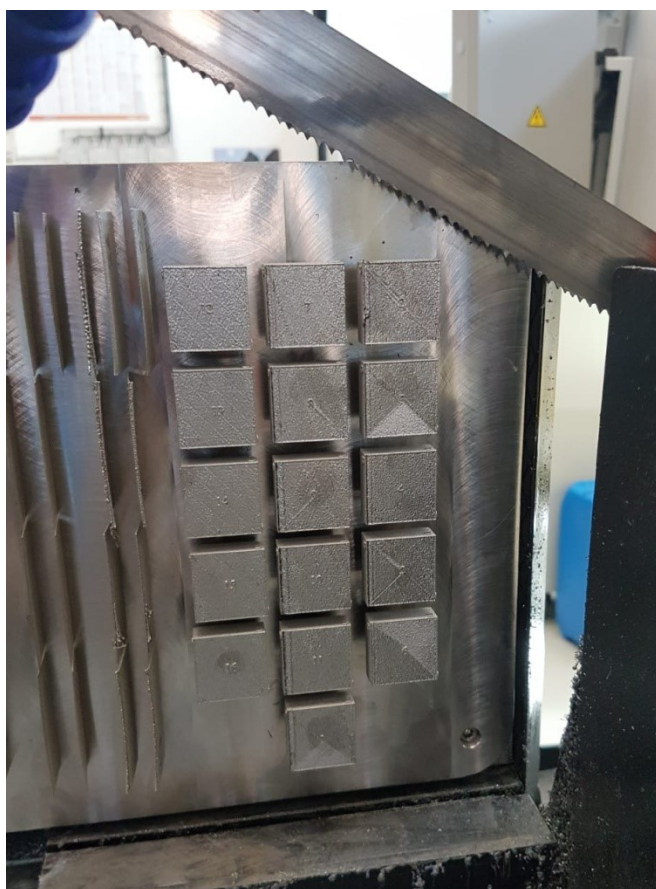
Zdroj: <https://www.renishaw.cz/cs/am-guide--41140>

8.2 Příprava vzorků

Vytisknuté vzorky jsme vyjmuli z 3D tiskárny na základní desce, vzorky bylo nutné od základní desky odřezat, pomocí pásové pily. Řezání bylo chlazeno chladicí kapalinou.



Obrázek 30 - Pásová pila od firmy Pegas



Obrázek 31 - Řezání vzorků

9. Aplikace dokončovacích operací

9.1 Omílání

Při této dokončovací operaci určuje výslednou mikrogeometrii povrchu doba omílání a materiál omílacích tělísek. Pro náš experiment jsme použili diskové odstředivé omílání za mokra. Pomocí stroje CF1 x 32 EL od firmy OTEC. Stroj byl vyrobený v roce 2018 v Německu. Při této dokončovací operaci dochází k mechanickému srovnání vrcholků povrchu do roviny. Použili jsme tři druhy omílacích tělísek nejprve, keramická, které mají největší úběr a zároveň zarovnají povrch potom plastová, která začnou leštit a nakonec porcelánová na úplné vyleštění. [3]



Obrázek 32 - Omílací stroj CF1 x 32 EL od firmy OTEC



Obrázek 33 - Omílací bublen s keramickými tělísky

Tabulka 3 - Dokončovací operace omíláním a její parametry

Skenovací strategie	Vz	Parametry	Poznámka
Meander	1	t ₁ = 120min keramická tělíska t ₂ =120min plastová tělíska t ₃ = 120min porcelánová tělíska	Odstředivý proces
Stripes	9	t ₁ = 120min keramická tělíska t ₂ =120min plastová tělíska t ₃ = 120min porcelánová tělíska	Odstředivý proces
Meander	7	t ₁ = 180min keramická tělíska t ₂ =120min plastová tělíska t ₃ = 120min porcelánová tělíska	Odstředivý proces
Stripes	15	t ₁ = 180min keramická tělíska t ₂ =120min plastová tělíska t ₃ = 120min porcelánová tělíska	Odstředivý proces
Meander	2	t ₁ = 240min keramická tělíska t ₂ =120min plastová tělíska t ₃ = 120min porcelánová tělíska	Odstředivý proces
Stripes	10	t ₁ = 240min keramická tělíska t ₂ =120min plastová tělíska t ₃ = 120min porcelánová tělíska	Odstředivý proces
Meander	4	t ₁ = 240min keramická tělíska t ₂ =120min plastová tělíska t ₃ = 120min porcelánová tělíska	Odstředivý proces + Tryskáno korundem
Stripes	12	t ₁ = 240min keramická tělíska t ₂ =120min plastová tělíska t ₃ = 120min porcelánová tělíska	Odstředivý proces + Tryskáno korundem
Meander	6	t ₁ = 240min keramická tělíska t ₂ =120min plastová tělíska t ₃ = 120min porcelánová tělíska	Tryskáno korundem + ocelový granulát
Stripes	14	t ₁ = 240min keramická tělíska t ₂ =120min plastová tělíska t ₃ = 120min porcelánová tělíska	Tryskáno korundem + ocelový granulát

Použitá omílací tělíska:

- Keramická tělíska – výrobce Otec DZS 10/10
- Plastová tělíska – výrobce Walther Trowal XS 12K
- Porcelánová tělíska – výrobce Otec P 2/5
- Kompaund – výrobce Walther Trowal KFL [20]

9.2 Tryskání

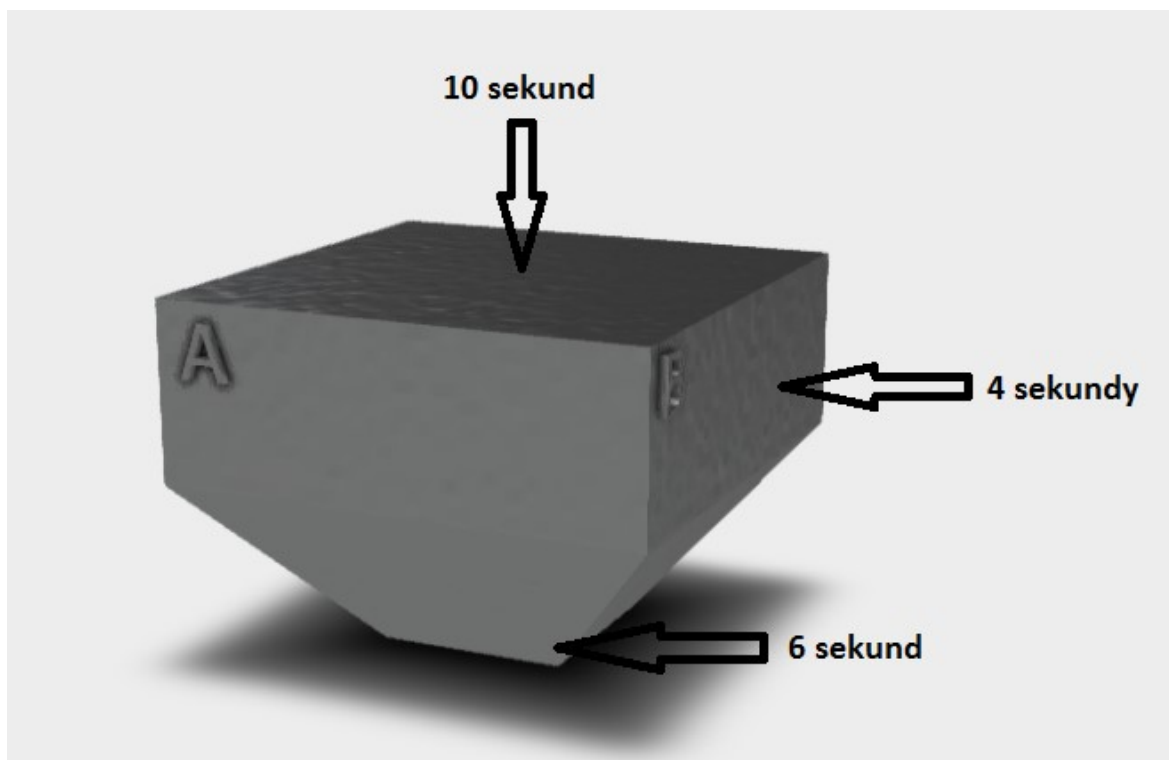
Tryskání slouží k hrubému odstranění nečistot z povrchu. Při tomto experimentu jsme použili jako tryskací médium korund a ocelový granulát. Velikost trysky je 5. Tryskání proběhlo v konstantním čase a vzdálenosti. Tlak tryskání byl 6 barů. Tryskání bylo kolmé k povrchu. [15]



Obrázek 34 - Použité tryskací zařízení Cabinet Sandblaster 350L



Obrázek 35 - Ocelový granulát S170



Obrázek 36 - Časy tryskání jednotlivých stran

Zdroj: Program AutoDesk Inventor Professional 2019

Vzorky byly tryskány v tryskací komoře, vzdálenost trysky od povrchu vzorku byla 30mm, tryska byla po celou dobu kolmo k povrchu. Všechny vzorky byly tryskány v konstantním čase, horní roviny 10 sekund, každá boční obvodová strana byla tryskána 4 sekundy a boční zkosená strana, každá z nich po dobu 6 sekund. Zařízení ve, kterém bylo tryskáno se nazývá Cabinet Sandblaster 350L model XH – SBC 350. Technické parametry tohoto zařízení jsou 230V, frekvence 50Hz, příkon 1200w.

Vzorky číslo 3,11,4,12 byly tryskány tryskacím médiem, které se nazývá hnědý korund, který je v koncentraci 90%. Označení tohoto tryskacího média je F – 24. Cena toho tryskacího media je 1 790kč za 25kg. Velikost jednotlivých zrn se pohybuje od 710 μm do 850 μm .

Vzorky číslo 5,13,6,14 byly rovněž tryskány hnědým korundem v koncentraci 90%, ale hned po této operaci následovalo další tryskání ocelovým granulát. Označení tohoto ocelového granulátu je S170. Cena tohoto ocelového granulátu je 1 790kč za 25kg. Velikosti jednotlivých zrn se pohybuje od 355 μm do 425 μm .

Po o tryskání vzorků 4,12 hnědým korundem a po o tryskání vzorků 6,14 hnědým korundem plus ocelovým granulátem následovala další dokončovací operace omíláním, pomocí odstředivého procesu. [11]

Tabulka 4 - Tryskání

Skenovací strategie	Vz	Parametry	Poznámka
Meander	3	L=30mm, p = 600 kPa, t ₁ =10s, t ₂ =4s, t ₃ =6s, tryskací medium: korund, tryskáno kolmo proti povrchu	Referenční vzorek bez dalších úprav povrchu
Stripes	11	L=30mm, p = 600 kPa, t ₁ =10s, t ₂ =4s, t ₃ =6s, tryskací medium: korund, tryskáno kolmo proti povrchu	Referenční vzorek bez dalších úprav povrchu
Meander	4	L=30mm, p = 600 kPa, t ₁ =10s, t ₂ =4s, t ₃ =6s, tryskací medium: korund, tryskáno kolmo proti povrchu	Po o tryskání následuje úprava povrchu omíláním
Stripes	12	L=30mm, p = 600 kPa, t ₁ =10s, t ₂ =4s, t ₃ =6s, tryskací medium: korund, tryskáno kolmo proti povrchu	Po o tryskání následuje úprava povrchu omíláním
Meander	5	L=30mm, p = 600 kPa, t ₁ =10s, t ₂ =4s, t ₃ =6s, tryskací medium: korund + ocelový granulát, tryskáno kolmo proti povrchu	Referenční vzorek bez dalších úprav povrchu
Stripes	13	L=30mm, p = 600 kPa, t ₁ =10s, t ₂ =4s, t ₃ =6s, tryskací medium: korund + ocelový granulát, tryskáno kolmo proti povrchu	Referenční vzorek bez dalších úprav povrchu
Meander	6	L=30mm, p = 600 kPa, t ₁ =10s, t ₂ =4s, t ₃ =6s, tryskací medium: korund + ocelový granulát, tryskáno kolmo proti povrchu	Po o tryskání následuje úprava povrchu omíláním
Stripes	14	L=30mm, p = 600 kPa, t ₁ =10s, t ₂ =4s, t ₃ =6s, tryskací medium: korund + ocelový granulát, tryskáno kolmo proti povrchu	Po o tryskání následuje úprava povrchu omíláním

10. Měření drsnosti povrchu

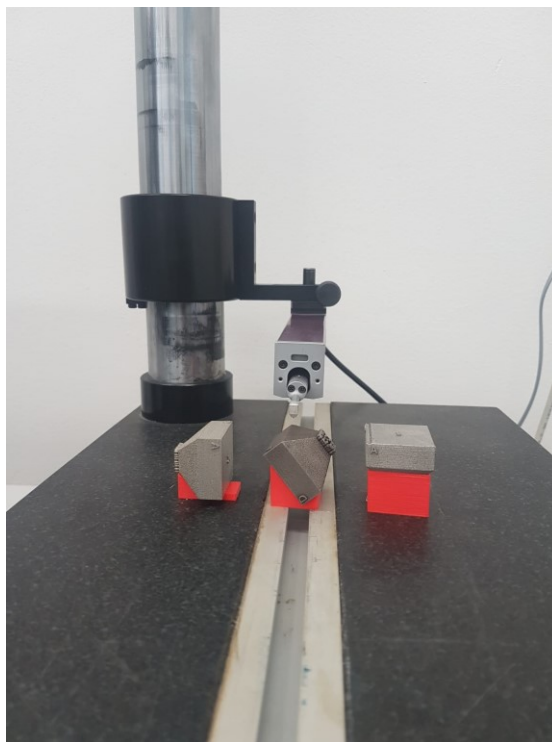
10.1 Měření 2D metodou

Drsnost povrchu jsem měřil pomocí 2D metody, přístrojem Mitutoyo SJ-210, který by před měřením kalibrován. Podle kalibrační destičky měří přístroj s přesností 0,001 μm . Měřicí zařízení, musí být vždy kolmé k měřenému povrchu. Na konci měřicí sondy je hrot, který je přitlačován k povrchu měřené součásti, při pohybu po povrchu je hrot neustále ve styku s měřeným povrchem. Hrot má kuželovitý tvar s kulovou špičkou. Každá strana vzorku byla měřena pětkrát. Všechny hodnoty měření, jsou zaznamenány v příloze. [19]



Obrázek 37 - Kontrola přesnosti drsnoměru

Pro zajištění kolmosti měření, bylo nutné navrhnout přípravky, do kterých jsem uložil vzorky, tak aby měřené roviny byly kolmé k měřicímu zařízení. Přípravky jsme navrhli v programu Inventor Professional 2019 a poté vytiskli na 3D tiskárně.

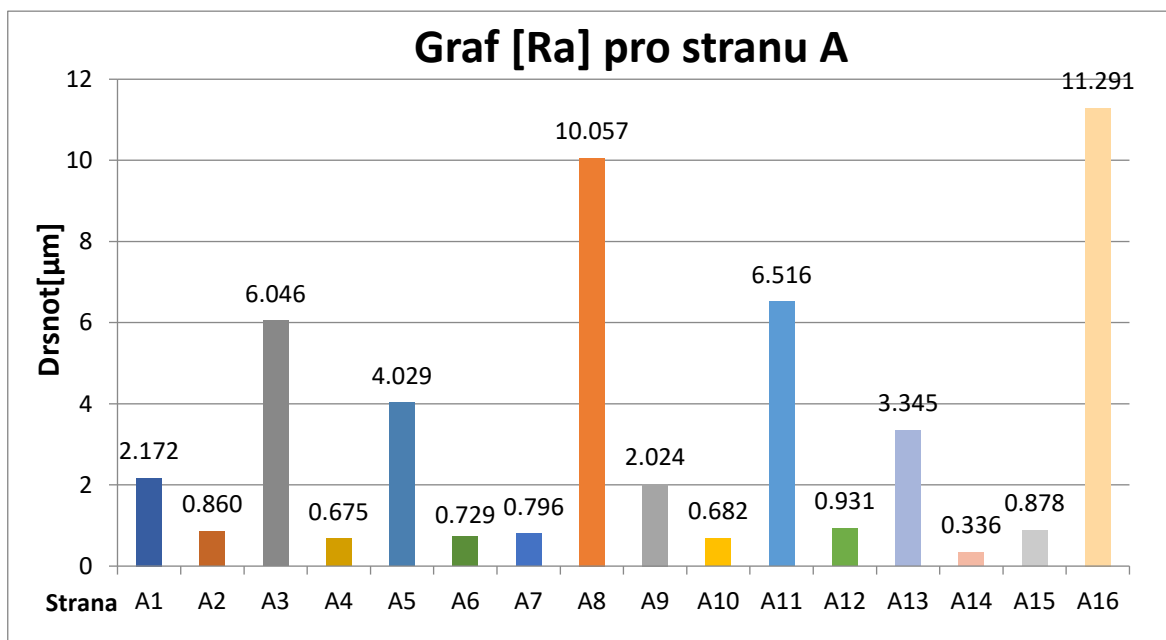


Obrázek 38 - Vzorky usazené v přípravcích

10.2 Vyhodnocení měření 2D metodou

Tabulka 5 – Drsnost Ra pro stranu A, Azk, P

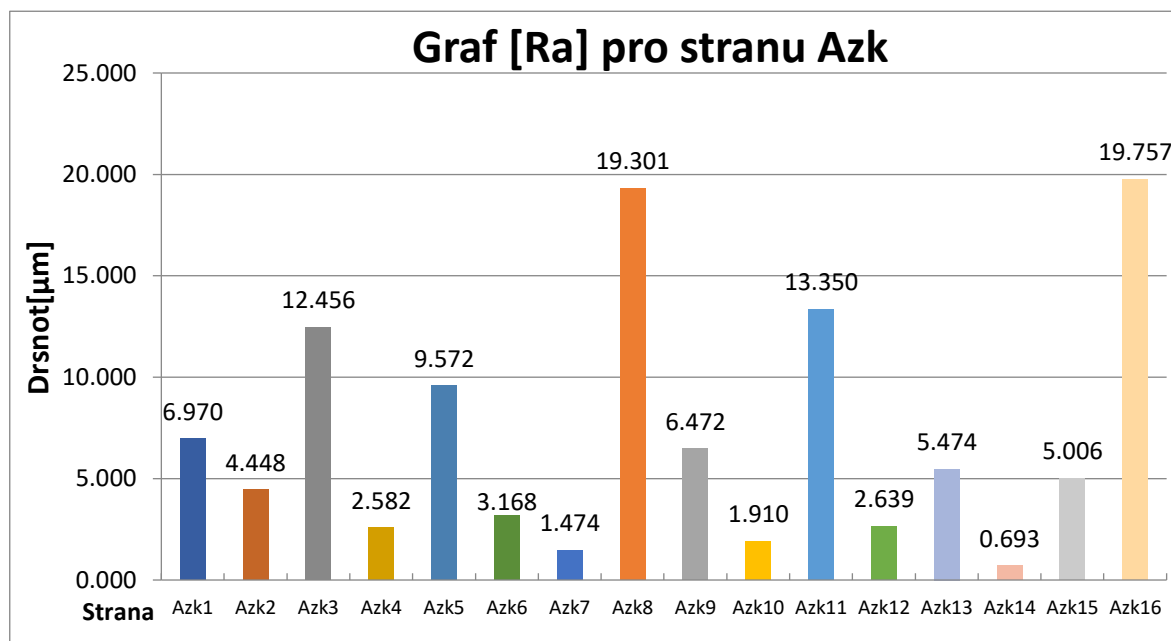
Strana	Aritmetický průměr	Strana	Aritmetický průměr	Strana	Aritmetický průměr
	[μm]		[μm]		[μm]
A1	2,172	Azk1	6,970	P1	2,470
A2	0,860	Azk2	4,448	P2	0,964
A3	6,046	Azk3	12,456	P3	5,569
A4	0,675	Azk4	2,582	P4	1,202
A5	4,029	Azk5	9,572	P5	3,967
A6	0,729	Azk6	3,168	P6	0,931
A7	0,796	Azk7	1,474	P7	1,668
A8	10,057	Azk8	19,301	P8	11,085
A9	2,024	Azk9	6,472	P9	1,241
A10	0,682	Azk10	1,910	P10	1,468
A11	6,516	Azk11	13,350	P11	7,038
A12	0,931	Azk12	2,639	P12	2,281
A13	3,345	Azk13	5,474	P13	3,722
A14	0,336	Azk14	0,693	P14	1,225
A15	0,878	Azk15	5,006	P15	1,086
A16	11,291	Azk16	19,757	P16	10,885



Graf 1 - Porovnání stran A

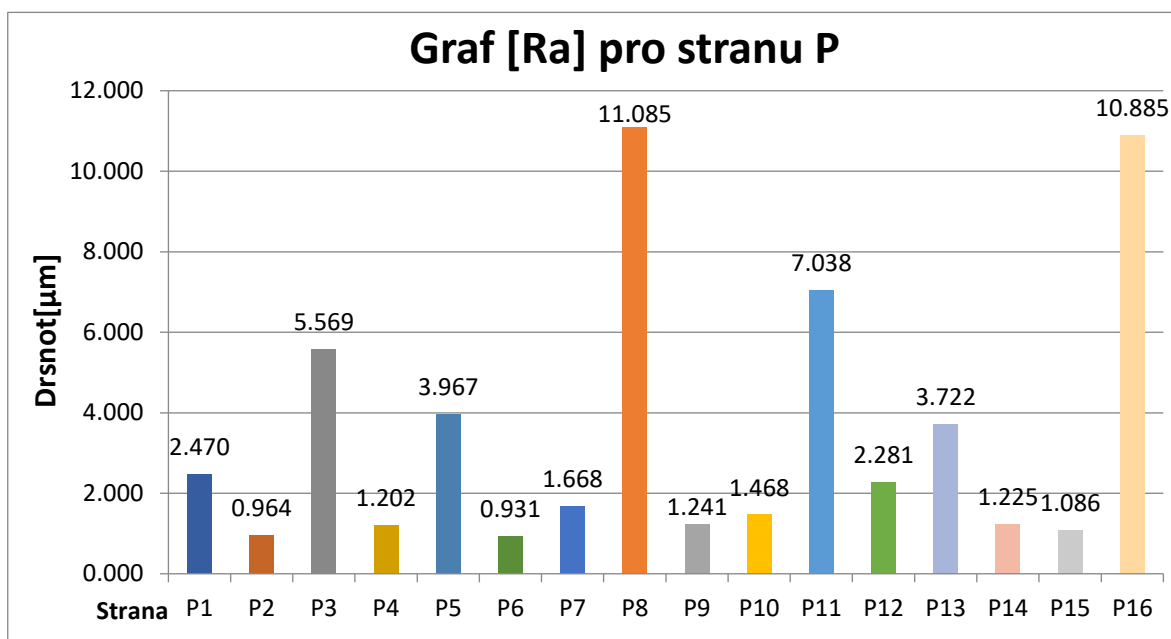
V grafu 1 jsem provedl srovnání všech obvodových stran A u všech jednotlivých vzorků, strana A je přední strana vzorků, z výsledku 2D měření drsnosti vyplynulo, že tato strana má v průměru u většiny vzorků největší drsnost. Tato drsnost může být způsobena nanášečem, který nanáší jednotlivé vrstvy směrem ze zadu dopředu. Nejmenší drsnost

strany A byla naměřena u vzorku číslo 14, vzorek byl vytisknutý pomocí strategie tisku Stripes a byla na něj uplatněna dokončovací operací operace (viz. tabulka 3) hodnota této drsnosti je $R_a=0,336 \mu\text{m}$. Hodnota drsnosti strany A u referenčního vzorku číslo 16 je $R_a=11,291 \mu\text{m}$. Z toho vyplývá, že po aplikaci těchto dokončovacích operací, byla drsnost strany A zhruba 33 krát nižší než na začátku.



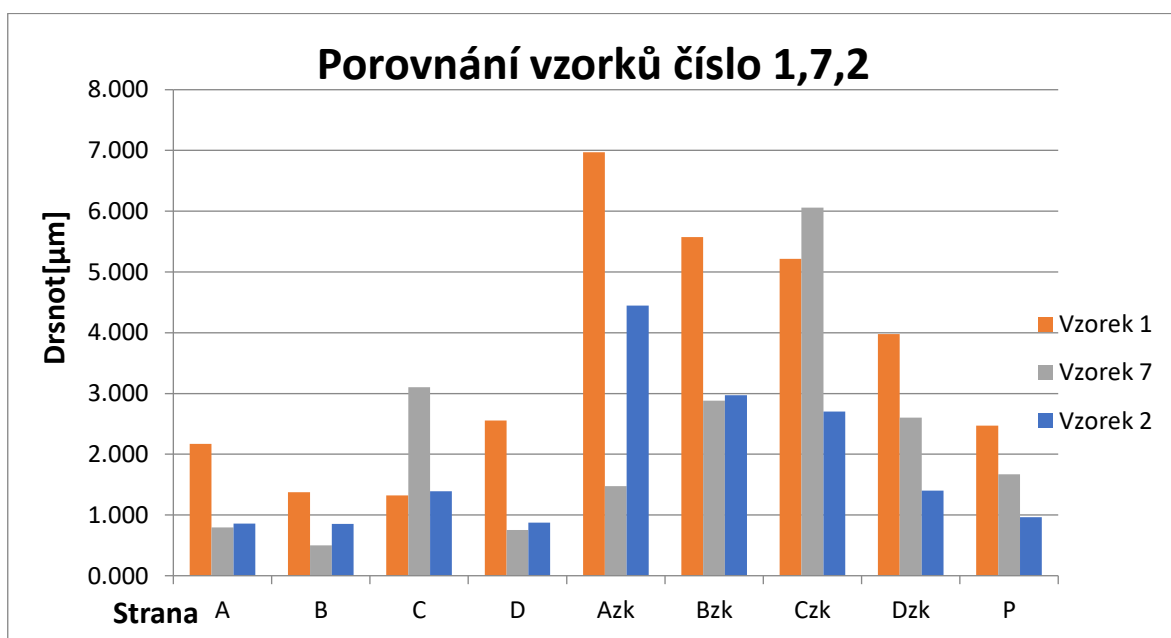
Graf 2 - Porovnání stran Azk

Při porovnání obvodových stran A, které jsou kolmé k základní desce, se stranami zkosenými Azk v úhlu 45° , je drsnost zkosených stran více jak dvojnásobná. Tato vysoká drsnost je způsobena, takzvaným kritickým úhlem 45° , je to poslední možný úhel, který je možný tisknout bez podpor. Nejmenší drsnost strany Azk byla naměřena u vzorku číslo 14 na, který byla uplatněna dokončovací operace (viz. Tabulka 3) hodnota této drsnosti je $R_a=0,693$. Hodnota drsnosti strany Azk u referenčního vzorku číslo 16 je $R_a=19,757 \mu\text{m}$. Z toho vyplývá, že po aplikaci těchto dokončovacích operací, byla drsnost strany Azk zhruba 28 krát snížena. Při porovnání referenčních vzorků číslo 8 a 16, vytisknutých pomocí strategie tisku Meander a Stripes, není velký rozdíl v drsnostech, dalo by se říci, že jsou téměř totožné. (viz Graf 2)



Graf 3 - Porovnání stran P

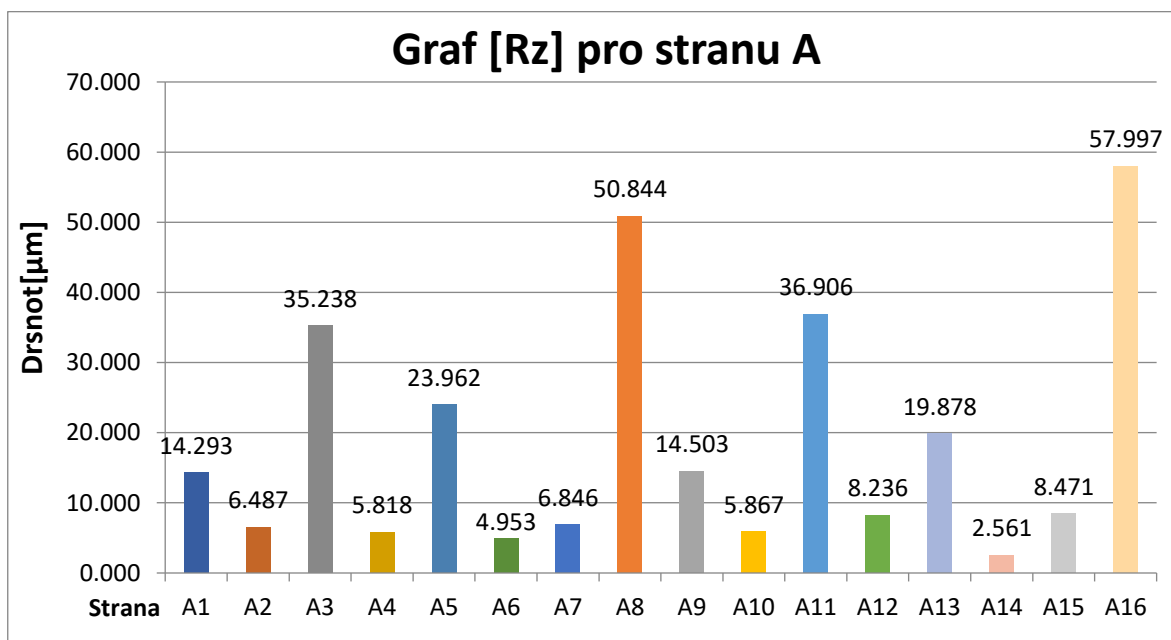
Při porovnání vrchní roviny vzorku vyšla nejmenší drsnost u vzorku číslo 6 na, který byla uplatněná dokončovací operace (viz Tabulka 3). Vzorek číslo 2 má prakticky totožnou drsnost s vzorkem číslo 6. Při úvaze polohy vzorku v komoře, má vodorovná rovina se základní deskou stejnou drsnost, jako kolmá rovina k základní desce. Drsnost zkosených stran je oproti vrchní rovině více jak dvojnásobná.(viz Graf 2)



Graf 4 - Porovnání vzorků

Tabulka 6 - Drsnost Rz pro stranu A, Azk, P

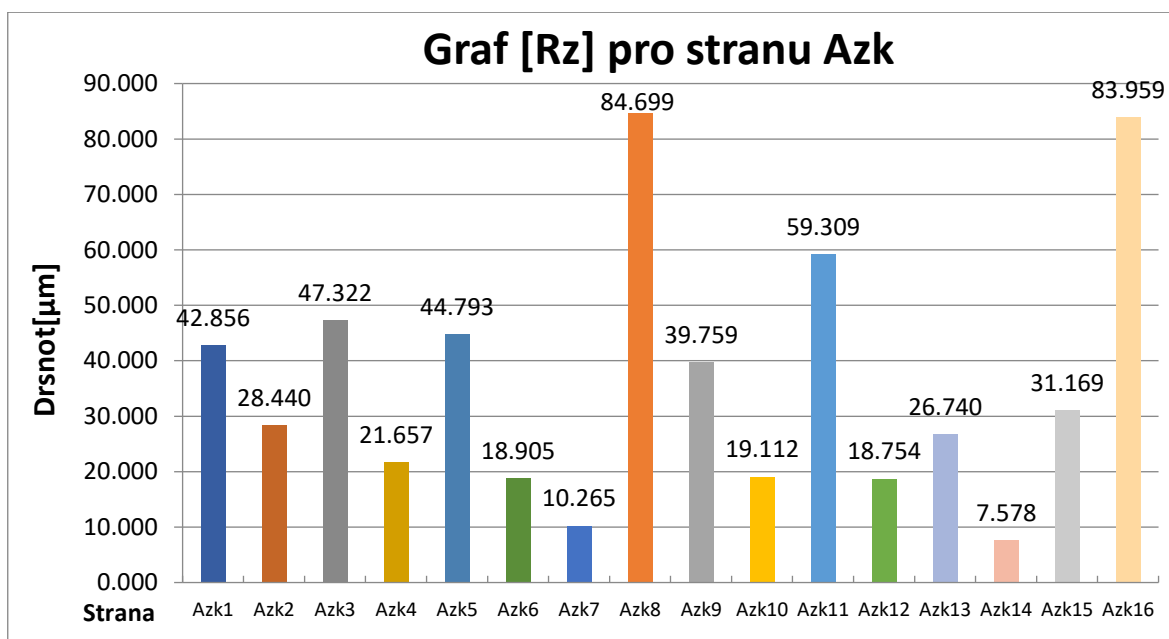
Strana	Aritmetický průměr	Strana	Aritmetický průměr	Strana	Aritmetický průměr
	[μm]		[μm]		[μm]
A1	14,293	Azk1	42,856	P1	11,007
A2	6,487	Azk2	28,440	P2	5,168
A3	35,238	Azk3	47,322	P3	19,208
A4	5,818	Azk4	21,657	P4	7,890
A5	23,962	Azk5	44,793	P5	19,848
A6	4,953	Azk6	18,905	P6	7,060
A7	6,846	Azk7	10,265	P7	9,074
A8	50,844	Azk8	84,699	P8	41,250
A9	14,503	Azk9	39,759	P9	6,084
A10	5,867	Azk10	19,112	P10	7,071
A11	36,906	Azk11	87,309	P11	28,671
A12	8,236	Azk12	18,754	P12	14,024
A13	19,878	Azk13	26,740	P13	19,756
A14	2,561	Azk14	7,578	P14	8,748
A15	8,471	Azk15	31,169	P15	6,170
A16	57,997	Azk16	83,959	P16	40,904



Graf 5 - Porovnání stran A [Rz]

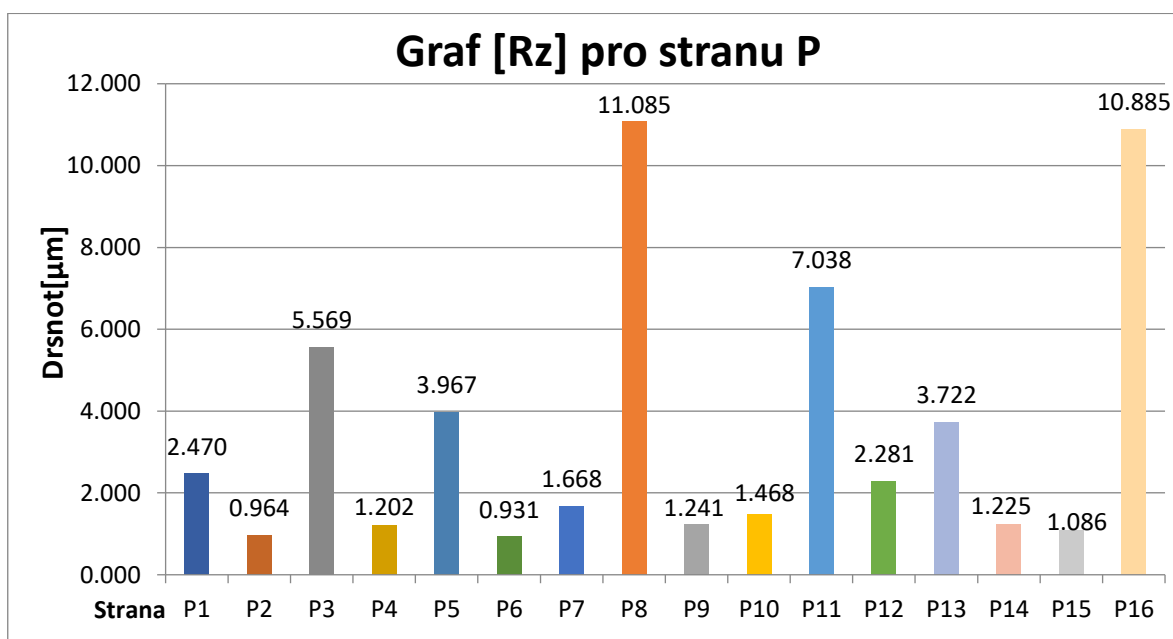
Nejmenší drsnost Rz u obvodové strany A, byla změřena na vzorku číslo 14, $R_z = 2,561 \mu\text{m}$, na který byly použity dokončovací úpravy (viz Tabulka 3), při porovnání se vzorkem číslo 6, který byl podroben stejné dokončovací operaci je hodnota drsnosti, téměř

poloviční (viz Graf 5). Při srovnávání s referenčním vzorkem je hodnota drsnosti zhruba 22krát nižší (viz Graf 5).



Graf 6 - Porovnání stran Azk [Rz]

Nejmenší drsnost Rz u strany Azk byla naměřena u vzorku číslo 14, tento vzorek prošel dokončovací úpravou (viz. Tabulka 3). Hodnota drsnosti je $Rz = 7,578 \mu\text{m}$. Při porovnání s drsností se stejným vzorkem se stranou A je hodnota 2,5 krát vyšší. (viz Graf 5). Nejvyšší hodnota drsnosti vzorku, na který byla provedena dokončovací operace (viz Tabulka 3), byla naměřena u vzorku číslo 11. Drsnost toho vzorku je $Rz = 59,309 \mu\text{m}$. (viz Graf 6)



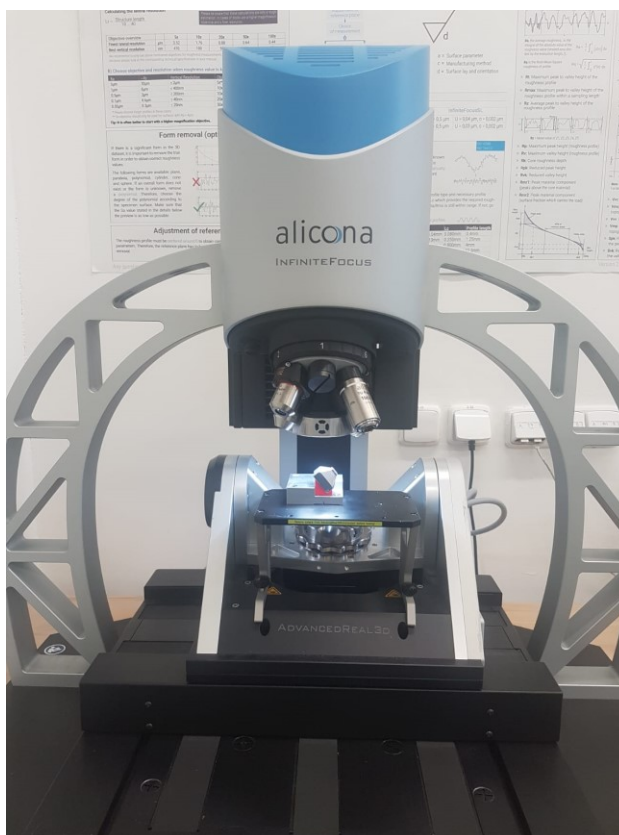
Graf 7 - Porovnání stran P [Rz]

Nejnižší drsnost vrchní strany vzorku byla naměřena na vzorku číslo 2, na který byla uplatněna povrchová úprava (viz. Tabulka 3). Nejvyšší drsnost vrchní strany u vzorku s dokončovací úpravou byla naměřena na vzorku číslo 11.

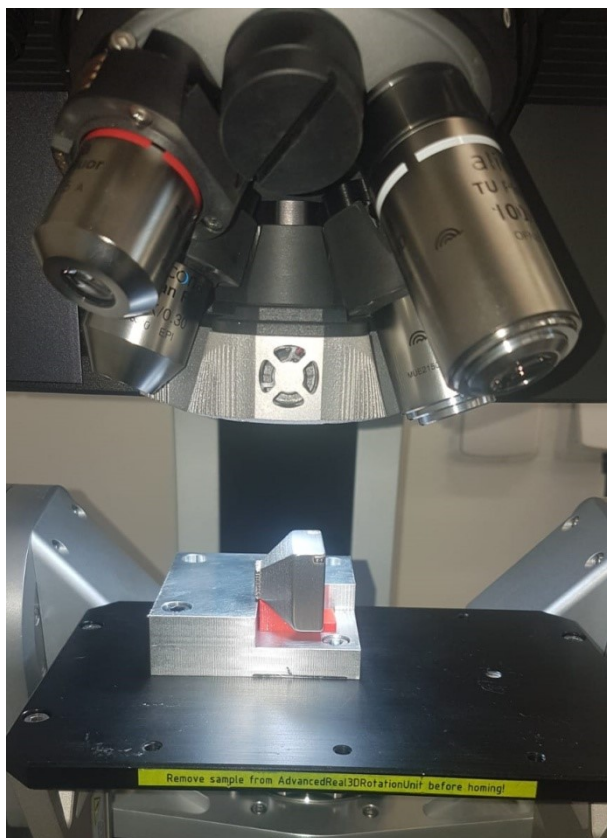
10.3 Měření drsnosti povrchu 3D metodou

Pro měření drsnosti povrchu 3D metodou bylo použito zařízení Alicona Infinite Focus 5. Toto zařízení pracuje na principu optického měření, součástí zařízení jsou objektivy, pomocí kterých, je možné měřit v různých rozlišeních. Zařízení disponuje vysokou přesností měření. Přístroj měří bez dotyků měřené součásti, tato měřicí metoda je vhodná pro použití měření součástí, vytisknutých 3D tiskem. Z toho důvodu, že se struktura vytisknuté součásti může na různých místech lišit, přístroj dokáže provést plošné měření, které je poté objektivnější. [21,23]

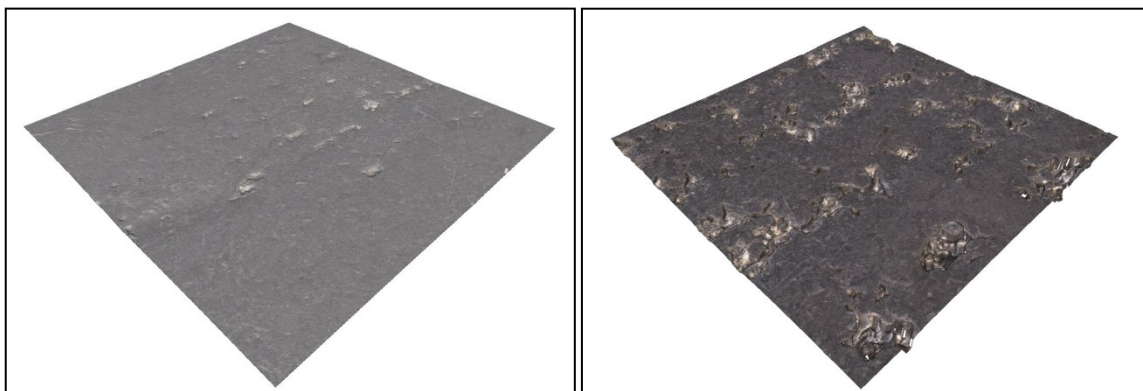
Nejdůležitější parametry pro vyhodnocování, byly zvoleny plošné parametry drsnosti S_a – průměrná aritmetická výška a S_z – maximální výška posuzované plochy, nejběžněji používané parametry pro posuzování povrchu. Pro měření byl zvolen S-filtr (Gassusův filtr). Každá jednotlivá strana vzorku byla měřena pětkrát. Z těchto pěti měření byl vypočítán aritmetický průměr. [8]



Obrázek 39 - Alicona Infinite Focus 5

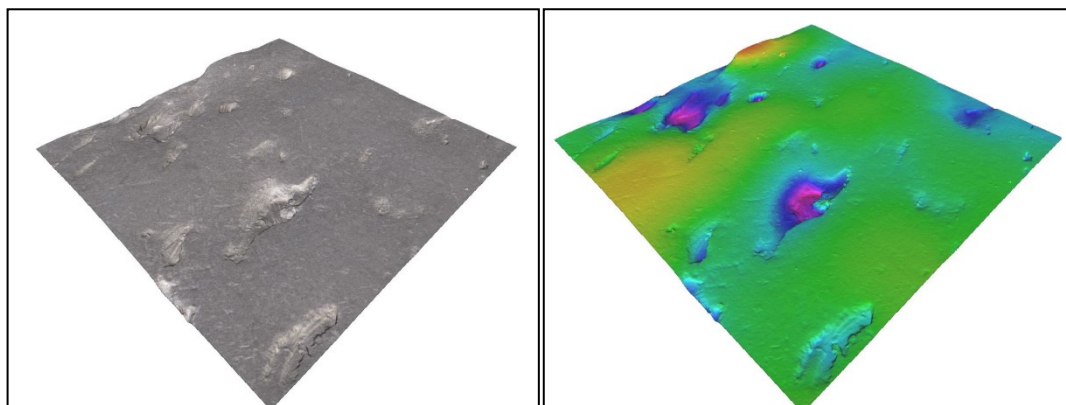


Obrázek 40 - Vzorek připravený k měření

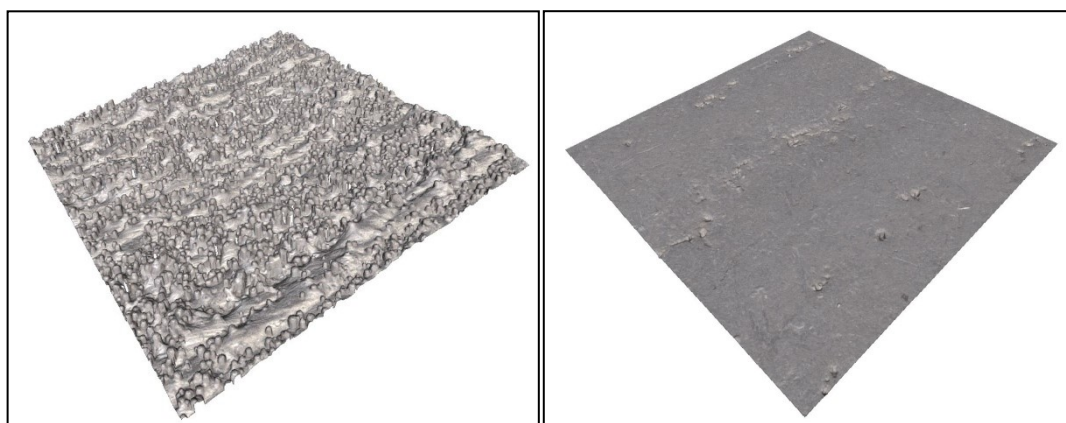


Obrázek 41 – Vzorek 10 strana A a Azk

Na obrázku je snímek povrchu vzorku číslo 10, na levé straně obrázku je strana A, na pravé straně je strana vzorku Azk, strana A je kolmá k základní desce na, které byl vzorek umístěn při tisku, strana Azk je v úhlu k základně 45°. Hodnota drsnosti strany A je $S_a = 0,685 \mu\text{m}$ a hodnoty drsnosti strany Azk je $S_a = 5,398 \mu\text{m}$. Z tohoto měření vyplívá, že zkosená strana u vzorku číslo 10 má zhruba 8 krát větší drsnost než kolmá strana.



Obrázek 42 – Vzorek č. 10 strana P



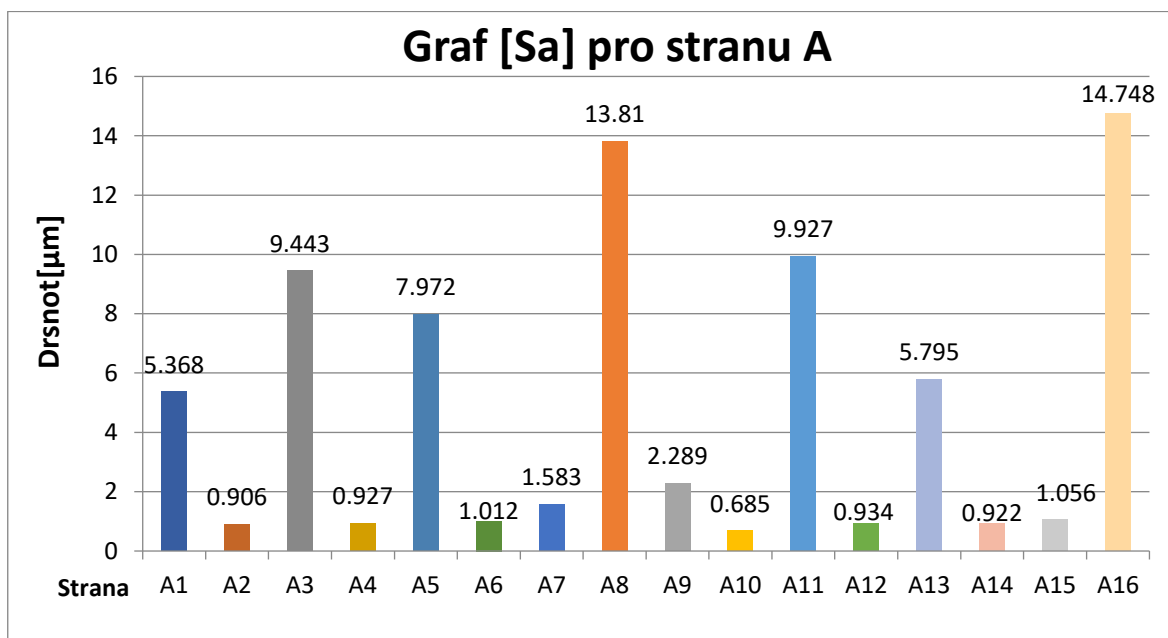
Obrázek 43 - Levá strana vzorek č. 8 A pravá strana vzorek č. 14 A

Na pravé straně je snímek referenčního vzorku číslo 8 bez použití aplikace dokončovacích operací. Na pravé straně je vzorek číslo 14, na který jsme použili dokončovací operaci (viz. Tabulka 13). Hodnota drsnosti u referenčního vzorku č. 8 je $S_a = 13,810 \mu\text{m}$. Hodnota drsnosti u vzorku číslo 14 je $S_a = 0,922 \mu\text{m}$. Rozdíly jsou jasně patrné (viz. Obrázek 46).

10.4 Vyhodnocení měření 3D metodou

Tabulka 7 - Drsnost Sa pro stranu A, Azk, P

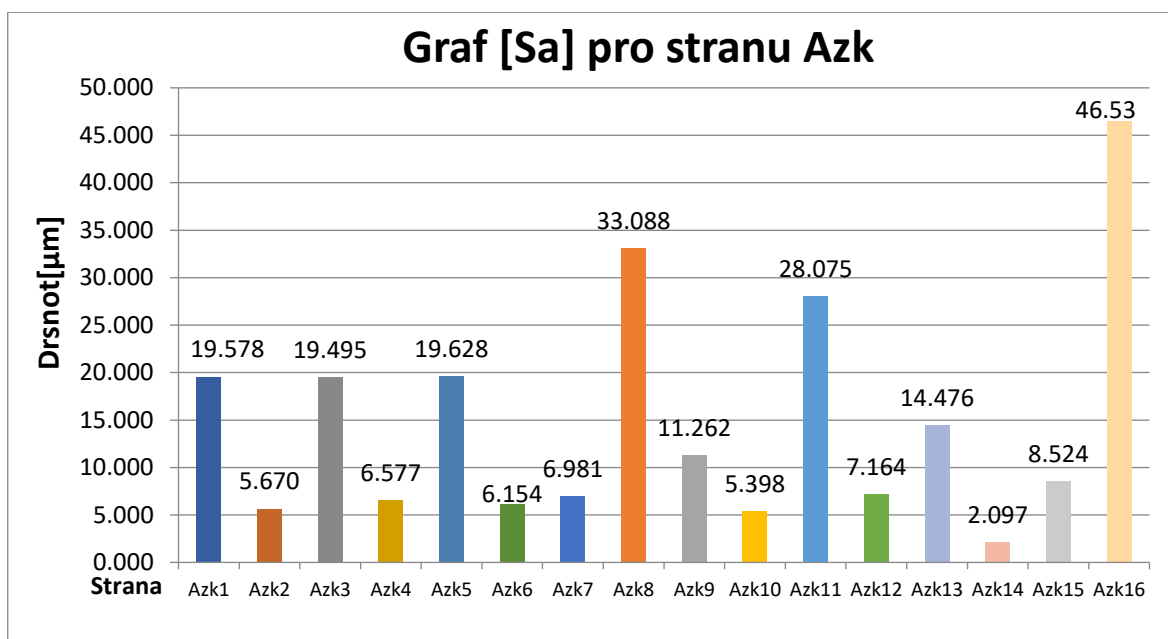
Strana	Aritmetický průměr	Strana	Aritmetický průměr	Strana	Aritmetický průměr
	[μm]		[μm]		[μm]
A1	5,368	Azk1	19,578	P1	5,109
A2	0,906	Azk2	5,670	P2	1,883
A3	9,443	Azk3	19,495	P3	10,296
A4	0,927	Azk4	6,577	P4	1,663
A5	7,972	Azk5	19,628	P5	9,123
A6	1,012	Azk6	6,154	P6	0,892
A7	1,583	Azk7	6,981	P7	1,771
A8	13,810	Azk8	33,088	P8	9,999
A9	2,289	Azk9	11,262	P9	2,211
A10	0,685	Azk10	5,398	P10	2,836
A11	9,927	Azk11	28,075	P11	13,789
A12	0,934	Azk12	7,164	P12	4,562
A13	5,795	Azk13	14,476	P13	9,850
A14	0,922	Azk14	2,097	P14	1,105
A15	1,056	Azk15	8,524	P15	1,892
A16	14,748	Azk16	46,53	P16	11,932



Graf 8 - Porovnání stran A [Sa]

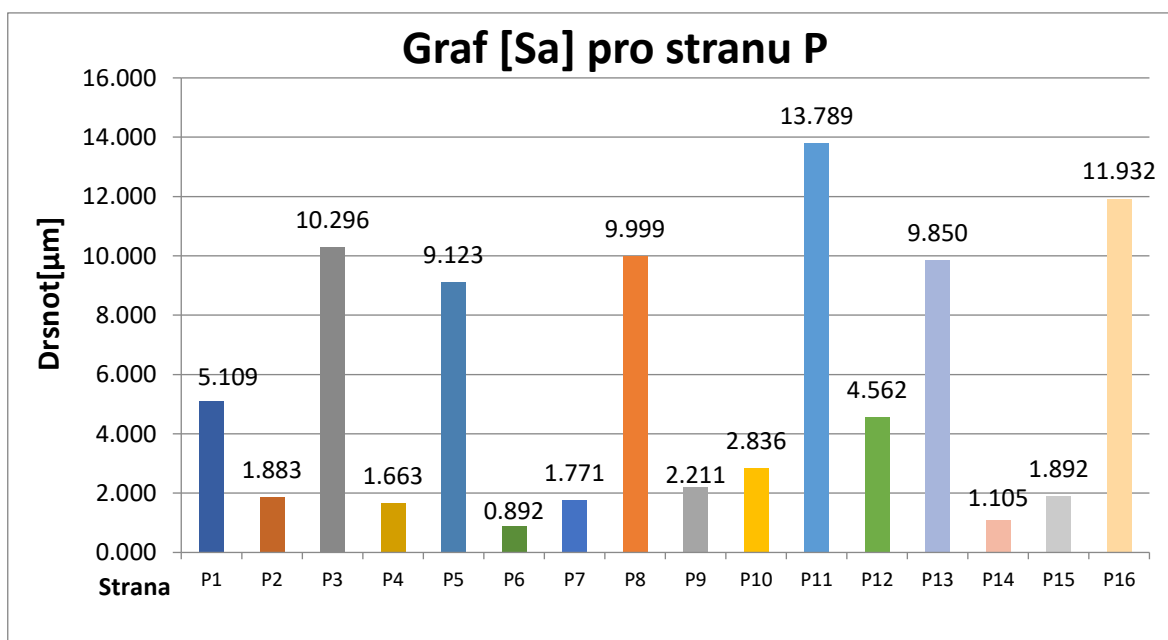
Při porovnání hodnoty Sa, z měření 3D metodou, vykazuje nejmenší drsnost strany A vzorek číslo 10, který prošel dokončovací úpravou (viz. Tabulka 3). Rozdíly mezi vzorky

číslo 2, 4, 12, 14 jsou minimální (viz. Graf 8), z důvodu uplatnění podobných dokončovacích operací.



Graf 9 - Porovnání stran Azk [Sa]

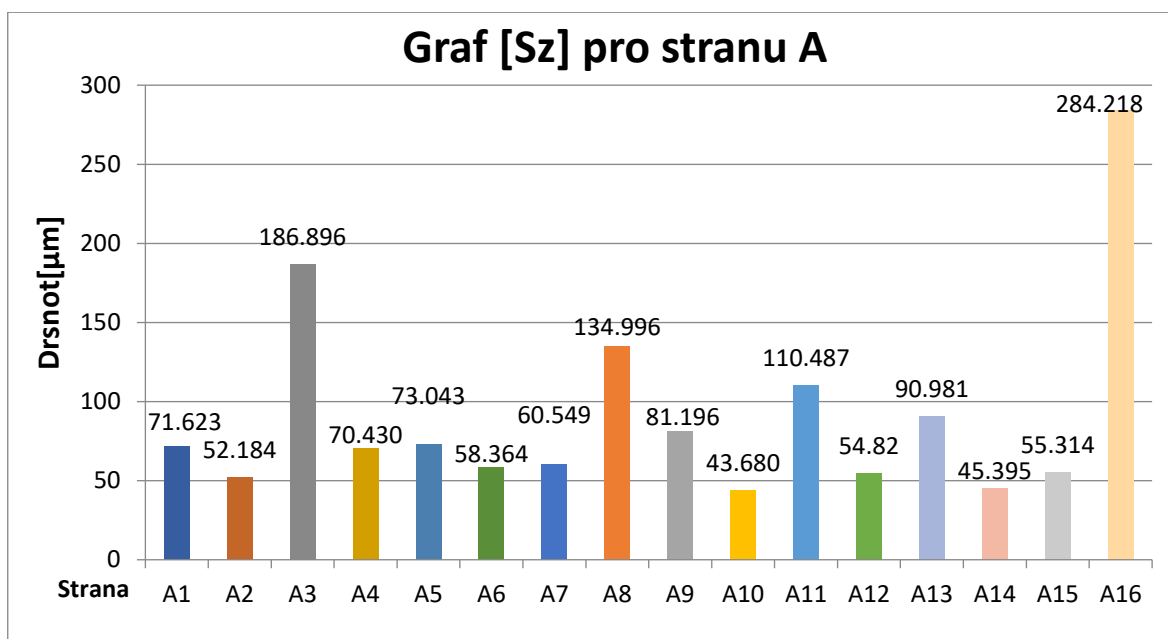
Při srovnání stran Azk, nejnižší drsnost měla strana vzorku číslo 14, který prošel povrchovou úpravou (viz Tabulka 3). Nejvyšší hodnotu drsnosti Sa, u vzorků, na které byla uplatněna dokončovací operace, byla naměřena u vzorku číslo 11 (viz Graf 9).



Graf 10 - Porovnání stran P

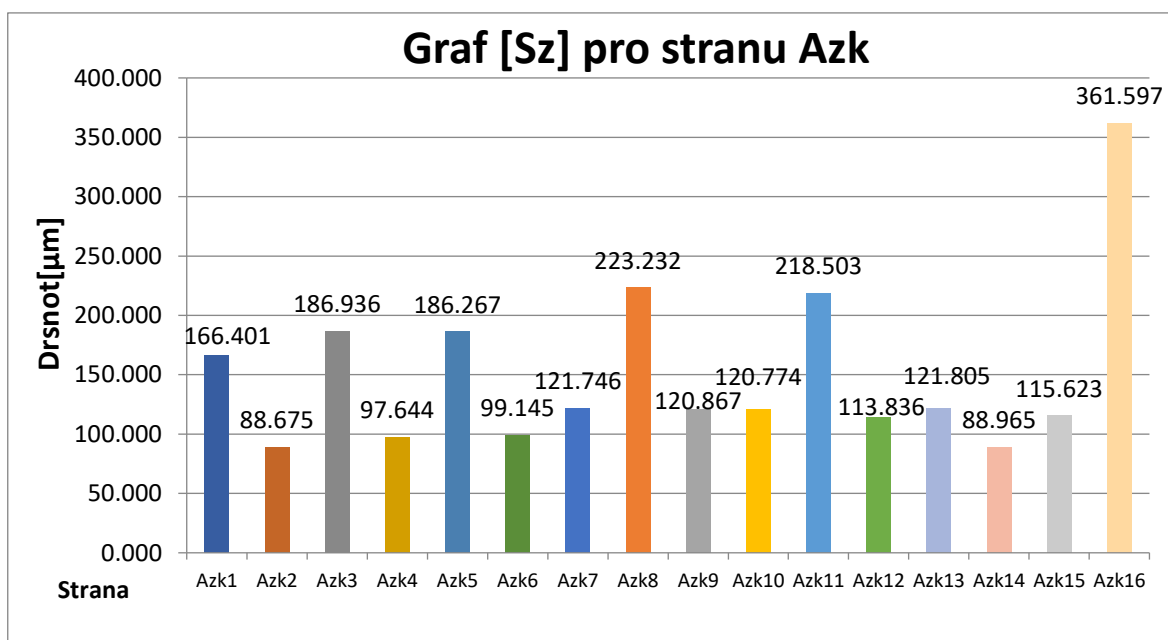
Při porovnání vrchních stran P, (viz Graf 10), nejmenší hodnota drsnosti Sa, byla zjištěna u vzorku číslo 6, který prošel dokončovací úpravou (viz Tabulka 3). Hodnota této

drsnosti je $S_a = 0,892 \mu\text{m}$. Nejvyšší hodnota drsnosti $S_a = 13,789 \mu\text{m}$, byla naměřena, u vzorku číslo 11, který prošel dokončovací úpravou (viz Tabulka 3).



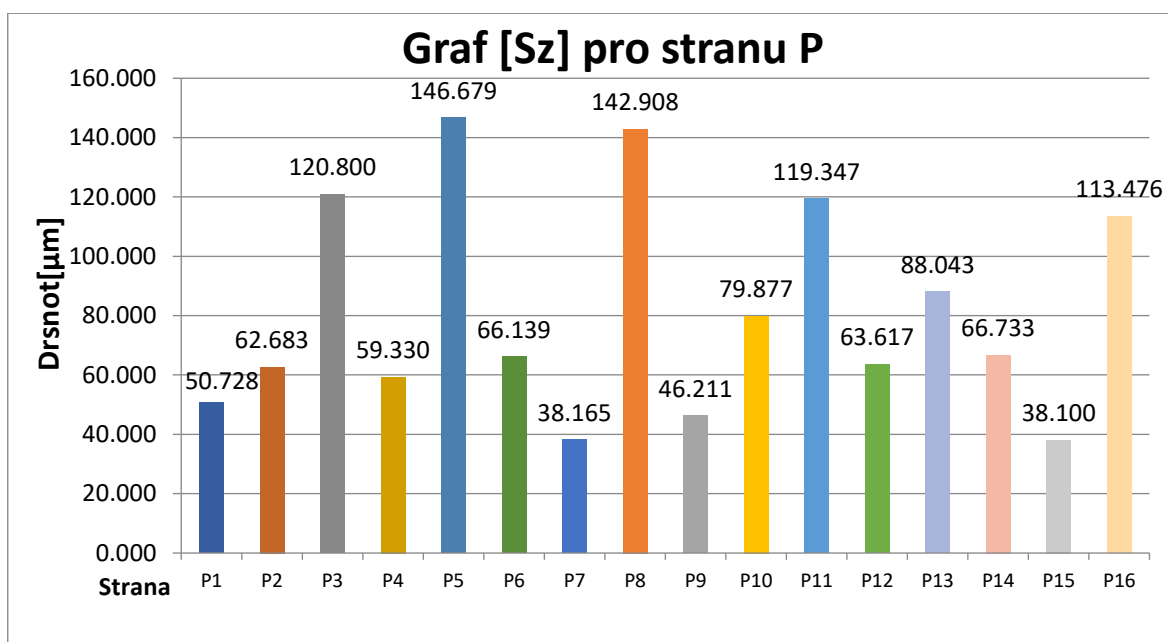
Graf 11 - Porovnání stran A [Sz]

Ve srovnání drsnosti Sz pro stranu A, vyšlo (viz Graf 11), vzorek číslo 10, má nejnížší drsnost, $S_z = 43,680 \mu\text{m}$. Nejvyšší drsnost strany A, byla naměřena u vzorku číslo 16, tento vzorek je referenční, nebyl podroben žádné dokončovací úpravě.



Graf 12 - Porovnání stran Azk [Sz]

Pro srovnání hodnot drsnosti Sz, byla nejmenší hodnota naměřena na vzorku číslo 2 a prakticky totožná hodnota byla naměřena na vzorku číslo 14 (viz Graf 12). Při srovnání drsností se referenčním vzorkem číslo 16, byla hodnota drsnosti 4 krát nižší.



Graf 13 - Porovnání stran P [Sz]

Při porovnání drsnosti Sz u horních stran vzorků, jsem zjistil, že nejmenší drsnost byla u vzorku číslo 7 a 15. Tyto vzorky prošly stejnou dokončovací operací (viz Tabulka 3). Největší drsnost Sz byla naměřena u vzorků číslo 5 a 8.

11. Zhodnocení výsledků

Podle výsledků měření, u většiny vzorků má největší drsnost strana A a Azk, je to přední strana vzorku, tato drsnost může být způsobena nanášečem, který nanáší vrstvu směrem ze zadu dopředu, dále z měření vyplývá, že strana B, která je ovlivněna prouděním argonu má u většiny vzorků velmi podobnou drsnost jako strana D, která je ovlivněna odsáváním argonu. Při porovnání obvodových stran, které jsou kolmé k základní desce, se stranami zkosenými v úhlu 45°, je drsnost zkosených stran více jak dvojnásobná. Při porovnání referenčních vzorků, vytisknutých pomocí strategie tisku Meander a Stripes, není velký rozdíl v drsnostech, dalo by se říci, že jsou téměř totožné.

Pro první porovnání jsem použil vzorky číslo 1,7,2 vytištěné pomocí strategie tisku Meander. Všechny tři vzorky byly omílány ve třech druzích omílacích tělísek, v plastových a v porcelánových tělískách byly všechny vzorky 120min. V keramických tělískách byly omílány vzorek číslo 1 po dobu 120min, vzorek číslo 7 po dobu 180min a vzorek číslo 2 po dobu 240min. Vzorek číslo 2 dosahuje v průměru nižších drsností než vzorek 7 (viz Graf 4). Proto lze říci, že čím déle byly vzorky omílány, tím nižší byla drsnost povrchu Ra.

Pro větší objektivitu výsledků jsem porovnal vzorky číslo 9,15,10 (viz. Příloha 1). Vytisknuté pomocí strategie tisku Stripes. Vzorky byly omílány za stejných podmínek jako vzorky číslo 1,7,2. Výsledek byl totožný. Prokázalo se, že vzorek číslo 15, který byl

v omílače 60 minut má nižší průměrnou drsnost Ra než vzorek číslo 10, který byl v omílacím budnu o 60 minut déle.

Dále jsem porovnával vzorky číslo 3 a 4, (viz Příloha 1) které byly vytisknuté strategií tisku Meander. Na vzorek číslo 3, byla uplatněna dokončovací operace tryskání hnědým korundem v konstantním čase, tlaku a vzdálenosti a na vzorek číslo 4 byla uplatněna stejná dokončovací operace, plus tento vzorek prošel procesem omílání 240min v keramických tělískách, 120min plastová tělíska a 120min porcelánová tělíska. Prokázalo se, že vzorek číslo 3, pouze po povrchové úpravě tryskáním vykazuje až 7 krát větší drsnost obvodových stran, než vzorek číslo 4, na kterém byla uplatněna kombinace tryskání a také omílání.

Vzorky číslo 11 a 12 (viz Příloha 1) vytištěné strategií Stripes, prošly stejnou úpravou jako vzorky 3 a 4 (viz Tabulka 3) a výsledek se potvrdil, vzorek číslo 11, který byl pouze tryskán hnědým korundem měl v průměru 7 krát větší drsnost než vzorek, který byl po tryskání dále omílán.

Dále následovalo porovnání vzorků číslo 4 a 6 (viz Příloha 1). Vzorek číslo 4 byl tryskán hnědým korundem a dále poté byl omílán, vzorek číslo 6, byl tryskán hnědým korundem a následně poté ocelovým granulátem a poté následoval proces omílání. Při porovnání drsností, jsem zjistil, že vzorek číslo 6 dosahuje jedny z nejnižších průměrných hodnot drsností Ra, z toho důvodu je možné říct, že se kombinace těchto operací jeví jako nejeefektivnější, oproti tomu vzorek, který byl tryskán pouze hnědým korundem, dosahuje prakticky totožných hodnot drsností Ra, jako vzorky, které byly pouze omílány ve stejných omílacích časech.

V průměru nejnižších drsností dosáhl vzorek číslo 14, (viz Příloha 1) který byl nejprve tryskán v konstantním čase a vzdálenosti ocelovým granulátem, poté hnědým korundem a poté byl omílán 240min v keramických tělískách, 120 min v plastových tělískách a 120minut v porcelánových tělískách. Tento vzorek měl zároveň nejnižší rozptyl hodnot. Průměrná hodnota drsnosti všech stran byla $Ra = 0,543 \mu m$, $Rz = 4,439 \mu m$, $Sa = 1,359$, $Sz = 60,425 \mu m$.

V průměru nejvyšších drsností dosahoval vzorek číslo 11, (viz Příloha 1), který byl pouze tryskán hnědým korundem v konstantním čase a vzdálenosti (viz Tabulka 3). Průměrná hodnota drsnosti všech jeho stran byla $Ra = 9,857$, $Rz = 35,457 \mu m$, $Sa = 18,621 \mu m$, $Sz = 157,277 \mu m$.

12. Závěr

Na základě výsledků z měření 2D a 3D metodou, jsem zjistil, že největší drsnost u obvodových stran vzorků, má strana A, je to přední strana vzorku, tato velká drsnost může být způsobena nanášečem, který nanáší jednotlivé vrstvy práškového kovu, směrem ze zadu dopředu. Při porovnání strany B, která byla umístěna v komoře na pravé straně, vystavena proudění argonu a porovnání strany D, která byla umístěna na levé straně komory, kde je argon odsáván, jsem zjistil, že drsnosti těchto dvou stran jsou téměř totožné. Proto je možné konstatovat, že směr proudění argonu nemá vliv na výslednou drsnost povrchu u námi vytištěných vzorků. Ukázalo se, že největší vliv na drsnost povrchu má zkosení stran. Při porovnání obvodových stran, které jsou kolmé k základní desce, s porovnáním stran, které jsou zkosené v úhlu 45°, byly drsnosti zkosených stran u většiny vzorků více jak dvojnásobné.

Dále jsem zjistil při porovnání, vzorků, které byli tištěny pomocí dvou rozdílných strategií tisku Meander a Stripes, jsou rozdíly v drsnostech těchto vzorků minimální jak u referenčních vzorků bez dokončovacích úprav, tak u vzorků, na které byly uplatněny dokončovací úpravy omílání a tryskání a kombinace těchto dvou dokončovacích metod. Z toho důvodu lze říci, že na drsnost povrchu tištěných vzorků nemá zásadní vliv použití strategie tisku Stripes nebo Meander.

Při aplikaci dokončovací operace omílání, jsme zjistili, že největší podíl na kvalitu drsnosti povrchu, má doba omílání a zvolený druh omílacích tělísek. Z výsledků lze říci, že čím déle jsme vzorky omílali, tím byla hodnota drsnosti R_a nižší, 6 vzorků bylo omíláno ve třech druzích omílacích tělísek, v plastových a v porcelánových tělískách byly všechny vzorky 120min. V keramických tělískách byly omílány vzorky číslo 1,9 po dobu 120min, vzorky číslo 7,15 po dobu 180min a vzorky číslo 2,10 po dobu 240min. Průměrná drsnost vzorků po 120minutách je $R_a = 3,219 \mu\text{m}$, po 180min je $R_a = 2,019 \mu\text{m}$, po 240min je $R_a = 1,754 \mu\text{m}$.

Z výsledků měření drsnosti po dokončovací operaci tryskání vyšlo, že kombinace tryskání pomocí dvou tryskacích medií, je více efektivní, než tryskání pouze jedním tryskacím médiem. Vzorky, byly tryskány v konstantním čase a vzdálenosti, aby byla zajištěna objektivita výsledků. Vzorky číslo 3,11 byly tryskány pouze hnědým korundem a jejich průměrná drsnost byla $R_a = 9,812 \mu\text{m}$ a vzorky číslo 5,13 byly tryskány hnědým korundem a hned poté ocelovým granulátem, jejich průměrná drsnost byla $R_a = 4,292 \mu\text{m}$. Na základě těchto výsledků je možné konstatovat, že se drsnost povrchu snížila více než o polovinu.

Při kombinaci operací tryskání a omílání, byly vzorky číslo 4,12 tryskány hnědým korundem a poté omílány ve třech omílacích médiích, v keramickém médiu 240min v plastovém médiu 120min a v porcelánovém médiu 120min. Výsledná průměrná drsnost byla $R_a = 1,775 \mu\text{m}$. Tato hodnota je velmi podobná, výsledné hodnotě vzorků, které byly pouze omílány, ve stejných časech, tudíž lze říci, že tryskání hnědým korundem bylo zbytečné a nemělo zásadní vliv na hodnotu drsnosti R_a . Jako nejúčinnější dokončovací metoda ze všech, pro zajištění co nejmenší drsnosti povrchu vyšla, kombinace tryskání hnědým korundem plus ocelovým granulátem a poté omílání v keramickém médiu 240min v plastovém médiu 120min a v porcelánovém médiu 120min, vzorky číslo 6,14, na které byly použity tyto dokončovací operace měly výslednou průměrnou hodnotu drsnosti $R_a = 1,212 \mu\text{m}$. Tato hodnota byla nejnižší průměrná hodnota drsnosti R_a , ze všech zkoušených operací.

Zdroje

- [1] 3D tisk kovů: Jak efektivně dokončovat vytištěné komponenty. <https://www.konstrukter.cz/> [online]. 2017 [cit. 2020-02-07]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/3d-tisk-kovu-jak-efektivne-dokoncovat-vytistene-komponenty/>
- [2] *Technologie pro povrchové úpravy: Omílání jako univerzální metoda pro úpravu povrchů* [online]. 2002 [cit. 2020-02-07]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/omilani-jako-univerzalni-metoda-pro-upravu-povrchu.html>
- [3] *Stroje pro procesy omílání: Dokonalá povrchy díky precizní finální úpravě* [online]. U Trati 970/38 100 00 Praha 10: OTEC-Maschinenuebersicht-CZ, 2019 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://advantage-fl.cz/prumysl/povrchova-uprava/omilani>
- [4] HRDINOVÁ, Hana. *Technologie leštění ve strojírenství*. Praha, 2013. Bakalářská práce. ČVUT. Vedoucí práce Doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.
- [5] HRDINOVÁ, Hana. *Vliv procesu omílání na upravovaný materiál*. Praha, 2015. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Jan Kudláček, Ph.D.
- [6] Tryskací materiály a zařízení. <https://www.comprexcz.cz/> [online]. Firma Comprex S.R.O, 2008, 2008 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://www.comprexcz.cz/tryskaci-materialy>
- [7] ČSN EN ISO 4287:1999. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu. ÚNMZ, Praha, 1999
- [8] NEZDAŘILÍKOVÁ, Martina. *Metrologická konfirmace a měřidla*. Brno, 2011. Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce Ing. Petr Koška, Ph.D.
- [9] *Abrasive media: Abrasive media for sandblasting equipment* [online]. Ethel Road West, Unit U Piscataway: Kramer Industries, 2019 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://www.kramerindustriesonline.com/product-category/abrasive-media/>
- [10] *Pískování nebo-li tryskání* [online]. Praha: Pískovačka.cz, 2016 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.piskovacka.cz/info-82-co-je-piskovani-cim-se-piskuje/>
- [11] *Tryskací prostředky* [online]. Kuřim: h-glost, 2016 [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://www.h-glost.cz/tryskaci-prostredky>
- [12] *Technologie 3D tisku kovů (SLM): Začínáme s 3D tiskem kovů* [online]. Ostrava: Vydavatelství Nová média, 2019 [cit. 2020-04-27]. Dostupné z:

<https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/>

[13] Práškové kovy pro aditivní výrobu. Renishaw plc. [online]. 2019 [cit. 2019-02-19]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/praskove-kovy-pro-aditivni-vyrobu--31457>

[14] KREIBICH, Viktor. *Teorie a technologie povrchových úprav*. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN isbn80-010-1472-x.

[15] *TRYSKACÍ SYSTÉMY* [online]. Valašské Meziříč: Karel Čapek, 2009 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <http://tryskani-piskovani.gds.cz/tryskaci-systemy#>

[16] SILBERNAGEL, Arnošt. *Struktura, vlastnosti, zkoušení a použití kovů*. Ostrava: Kovosil, 2011. ISBN isbn978-80-903694-6-7.

[17] *Studium mikrostruktury a mechanických vlastností ocelových vzorků zhotovených 3D tiskem* [online]. Ostrava, 2017 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/117463/DOB0064_FS_N2301_2303T002_20_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[18] JASEK, Adam. *Metody dokončovacích povrchových úprav 3D vytištěných plastových modelů*. Ostrava, 2017. Bakalářská práce. VŠB. Vedoucí práce Ing. Marek Pagáč, Ph.D.

[19] Elcometer Gamin: Přenosný drsnoměr Mitutoyo [online]. Ostrava: Gamin S.R.O, 2017 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.elcometer.cz/mitutoyo-sj-210/>

[20] Walther Trowal: CHIPS & COMPOUNDS [online]. Praha: Trowal CZ s.r.o, 2018 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <http://www.trowal.cz/chips-compounds>

[21] HAJNÝŠ, Jiří. *Výzkum vlivu dokončovacích operací na modifikaci užitečných vlastností součástí vyrobených aditivní technologií*. Ostrava, 2019. Disertační práce. VŠB

[22] AM 400: Systémy pro aditivní výrobu z kovu [online]. Renishaw, 2019 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/am-400--35456>

[23] Non contact metrology 3d surface: Alicona Infinite Focus [online]. Wales: Optimax, 2019 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://optimaxonline.com/non-contact-metrology-3d-surface-characterisation/37/alicona-infinitefocus-g5>

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Omílací stroj řady SF	13
Obrázek 2 - Na levé straně součást před omíláním a na pravé straně po omílání	14
Obrázek 3 - Jednotka Pulsfinish	15
Obrázek 4 - Omílací stroj z řady eco.....	17
Obrázek 5 - Vibrační žlab HV20	17
Obrázek 6 - Separace standartní	18
Obrázek 7 - Separace prutová	18
Obrázek 8 - Magnetická separace	19
Obrázek 9 - Omílací médium	19
Obrázek 10 - Ocelový granulát	21
Obrázek 11 - Tlakovzdušné a metací tryskáčské zařízení	23
Obrázek 12 - Injektorový systém.....	24
Obrázek 13 - Tlakový systém.....	25
Obrázek 14 - Metací kolo	26
Obrázek 15 - Ocelový granulát	28
Obrázek 16 - Ocelová drť.....	28
Obrázek 17 - Nejvyšší výška profilu drsnosti R_p	29
Obrázek 18 - Nejhlubší prohlubně profilu.....	30
Obrázek 19 - Nejvyšší výška profilu drsnosti.....	30
Obrázek 20 - Srovnání průměru laserového paprsku	31
Obrázek 21 - Schéma systému Renishaw AM400	31
Obrázek 22 - Popis pracovní komory zařízení Renishaw AM 400	32
Obrázek 23 - Nepoužitý prášek okolo tištěného modelu.....	33
Obrázek 24 - Prosévací zařízení na prášek	33
Obrázek 25 - 3D model referenčního vzorku	35
Obrázek 26 - Schéma vzorku	35
Obrázek 27 - Zařízení AM400 od firmy Renishaw	36
Obrázek 28 - Skenovací strategie Stripes	37
Obrázek 29 - Skenovací strategie Meander	37
Obrázek 30 - Pásová pila od firmy Pegas	38
Obrázek 31 - Řezání vzorků	38
Obrázek 32 - Omílací stroj CF1 x 32 EL od firmy OTEC.....	39
Obrázek 33 - Omílací buben s keramickými tělísky.....	39
Obrázek 34 - Použité tryskáčské zařízení Cabinet Sandblaster 350L	41
Obrázek 35 - Ocelový granulát S170	41
Obrázek 36 - Časy tryskání jednotlivých stran	42

Obrázek 37 - Kontrola přesnosti drsnoměru.....	44
Obrázek 38 - Vzorky usazené v přípravcích.....	44
Obrázek 39 - Alicona Infinite Focus 5.....	50
Obrázek 40 - Vzorek připravený k měření.....	51
Obrázek 41 – Vzorek 10 strana A a Azk.....	51
Obrázek 42 – Vzorek č. 10 strana P.....	52
Obrázek 43 - Levá strana vzorek č. 8 A pravá strana vzorek č. 14 A.....	52

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Chemické složení ocelového granulátu	28
Tabulka 2 - Chemické složení ocelové drti	28
Tabulka 3 - Dokončovací operace omíláním a její parametry.....	40
Tabulka 4 - Tryskání.....	43
Tabulka 5 – Drsnost Ra pro stranu A, Azk, P	45
Tabulka 6 - Drsnost Rz pro stranu A, Azk, P	48
Tabulka 7 - Drsnost Sa pro stranu A, Azk, P	53

Diplomová byla vypracována za podpory projektu: „Specifický výzkum inovativních technologií výroby“, reg. č. „SP2020/27“ Specifického výzkumu financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.